



ТРАКИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СТАРА ЗАГОРА

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Катедра „Енергетика“

маг. инж. Никола Емилов Байкалов

**АНАЛИЗ НА ПУСКОВИТЕ РЕЖИМИ НА КОТЛИ
ИЗГАРЯЩИ ЛИГНИТНИ ВЪГЛИЩА, С ЦЕЛ
ПОВИШАВАНЕ НА ТЯХНАТА ЕКСПЛОАТАЦИОННА И
ЕКОЛОГИЧНА СИГУРНОСТ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертационен труд за придобиване на образователна и научна
степен "доктор"**

научна специалност

“Енергопреобразуващи технологии и системи”

Научен ръководител

доц. д-р инж. Борислав Митков Игнатов

Стара Загора, 2023г.

Дисертационният труд е с обем 155 страници. Съдържа седем части – въведение, пет глави и заключение, което включва постигнатите приноси. Дисертацията съдържа 69 фигури и 48 таблици. Цитирани са 156 литературни източника.

Номерацията на фигурите, таблиците и формулите е в съответствие с номерацията, използвана в дисертацията.

Обсъждане и вътрешна защита на дисертационния труд се проведе на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Енергетика” на факултет „Техника и технологии“ на Тракийски университет – Стара Загора, на 21.12.2023 г.

Автор: Никола Емилов Байкалов

Заглавие: „Анализ на пусковите режими на котли изгарящи лигнитни въглища, с цел повишаване на тяхната експлоатационна и екологична сигурност”

Тираж:

ГЛАВА ПЪРВА

Актуалност на проблема и постановка на задачата

1.1. Актуални проблеми при използването на мазут в пусковите периоди на котлите в ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД

Пусковите режими на котлите са неблагоприятни по отношение на технико-икономическите показатели и експлоатационните характеристики. Недопустимите замърсявания на околната среда със серни окиси и прах (при тези режими) се дължат на ограничената работа на ЕФ и СОИ. Тези съоръжения не работят, поради наличие на мазни сажди в димните газове, отделяни от изгаряния за разпалването на мазут. На практика почистващите съоръжения и системи в този период не работят за да бъдат предпазени от замърсяване в пусковите режими от една страна, а от друга за да бъдат в готовност за работа при вече стационарните режими на работа на котлите, когато се изгарят само въглища.

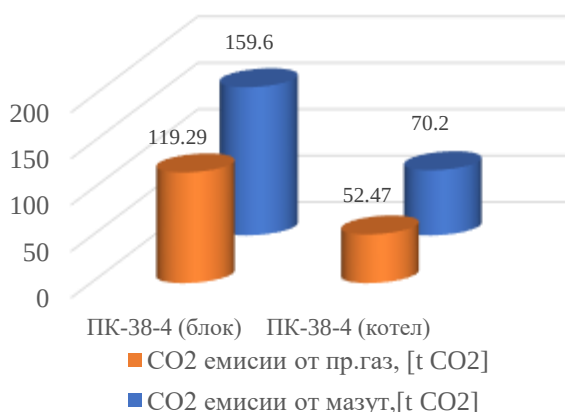
Преминването на разпалване с природен газ и пускане на ЕФ и СОИ преди пускане на въглищни горелки би довело до намаляване на вредните емисии при пуск от студено и горещо състояние, както е показано в Таблица 1.1:

Таблица 1.1.

Не на последно място е и сравнителния анализът на CO₂ емисиите по време на пуск при двата различни вида разпалващо гориво.

Изчисляването на емисиите се извършва по методика описана в Регламент 601/2012. Операторът следва да определя изчислителните коефициенти или в съответствие с възприети стойности (default values), или въз основа на лабораторен

анализ, в зависимост от прилаганото поддръждане. В нашия случай се използват възприети стойности. Тези стойности са описани в Приложение.VI. от Регламент 601/2012. При тази методика количеството на изгореното гориво на база долната топлина на изгаряне се умножава със съответния емисионен фактор и по съответния коефициент на окисление.



Фигура.1.1. Въглеродни емисии от пуск на котли ПК-38-4

Намалението на CO₂ емисиите получени при разпалване на котлите с природен газ е с приблизително 25% по-малко от тези при използване на мазут. Тук трябва да се обърне внимание и на това, че следствие от замяната на мазута с природен газ, освен екологичния ефект, също от голямо значение е и икономическия ефект – намаляване на разходите за гориво, увеличаване на експлоатационния живот на димните вентилатори, по-малко шлаковане в пещна камера вследствие на доброто изгаряне на мазута и т.н.

1.2. Цел, постановка и структура на дисертационния труд

1.2.1. Цел на дисертационния труд

Въвеждането в експлоатация на енергиен котел, след известен престой, е един от най-отговорните и сложни нестационарни режими на работата му. Когато този процес е съчетан и с промяна на горивото, което се използва за разпалването му, се изискват допълнителни анализи и оценки за влиянието на тези процеси върху неговата сигурна, ефективна и екологична работа. Именно тази цел си поставя настоящата работа: Да бъде оценено поведението на енергийните парогенератори, изгарящи нискокачествени лигнитни въглища, при промяна на разпалващото гориво (от мазут на природен газ), с помощта на ефективностни, експлоатационно-надеждностни и екологични критерии.

1.2.2. Постановка на дисертационния труд

След подробен статистически анализ на пусковете в ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД се стигна до заключението, че най-често котлите се пускат в действие от „Студено състояние“ и от „Горещо състояние. Също така е пресметнат и е илюстриран т.н. „Изчислителен разход на мазут“ по време на пусковите операции за 2014 година. Средният разход на мазутна горелка е 1,5 t/h за котли ПК-38-4.

Пусковите режими на котлите са неблагоприятни по отношение на технико-икономическите показатели и експлоатационните характеристики. Първоначално, в периода на пуск, се изгаря само течното гориво, а след достигане на определени експлоатационни параметри се пускат и прахови горелки. Формирането на серни оксиди първоначално се дължи на сярата, съдържаща се в течното гориво. След пускането в действие на прахови горелки, серни оксиди се образуват и от сярата, съдържаща се във въглищата. Същото се отнася и до праховите частици. Периодът на пуск е условно разделен на три етапа:

- Първи етап - работят само мазутни горелки (МГ);
- Втори етап - работят МГ и прахови горелки;
- Трети етап - работят само прахови горелки.

След въвеждането на природен газ за разпалване на котлите, се появяват и първите проблеми, заради които започва изследването на газовите горелки на котлите - това е наложено след стартиране на пилотната инсталация за замяна на мазута като разпалващо гориво с природен газ на котел №6 (ПК-38-4). След проведени пусково-настроечни мероприятия по КА-6 и преминаване към основното гориво – въглища, се стига до спирането му в следствие от недостиг на температури в печната камера. По време на пусковите операции за този пуск се използват 5 газови горелки, всяка от които е с проектен номинален разход от 1800 Nm³/h., което като топлинна мощност е достатъчно да се извърши пускът на горелки на въглища.

След осъществяването на няколко пускове на котли на природен газ възникват проблеми с нормалната експлоатация на ИВП и ЕФ. Направени са изчисления, а след това и опити с променени пускови алгоритми, намалено количество въздух, и т.н., като

са установени основните репери за включване на праховите горелки, ЕФ и СОИ, при които те да работят надеждно. Анализирано е влиянието на броя работещи газови горелки и коефициента на излишък на въздух α върху температурата ($t_{дг}$) и влагосъдържанието ($X_{дг}$) на димните газове, също така и температурата на кондензация на влагата в димните газове, а от там и влиянието върху работата на ИВП и ЕФ. Установени са недостатъци по разпалващата схема:

- технологично е невъзможно да се ограничи излишния въздух за горене към ПК, поради неплътности в клапата за горещ въздух към праховите горелки.
- заложи са по-високи защитни стойности на въздуха за горене на газовата инсталация
- включването на праховите горелки се съобразява само с температурата на ДГ в ПК, която трябва да бъде по-висока от 450°C.

Преди включването на ЕФ и на прахова горелка, от съществено значение е да се следи и температурата на ДГ след ИВП, която трябва да бъде над 142°C за да се избегне кондензацията на влагата в ДГ и последващо замърсяване на нагревните повърхности и нискотемпературна корозия.

1.2.3. Структура на дисертационния труд



Фигура 1.2 Структура на дисертационния труд

ГЛАВА ВТОРА

Описание на обекта на изследване

2.1. Описание на котлите в ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД и използваните горива

ТЕЦ „Марица Изток 2“ е най-голямата кондензационна топлоелектрическа централа в България. Тя е една от трите електроцентрали в комплекс „Марица Изток“, който е разположен в югоизточната част на страната. След извършената рехабилитация, мощността на централата достигна 1610 MW инсталирана брутна електрическа мощност. Като основно гориво се използват лигнитни въглища, които се изгарят във факел в пещните камери на енергийните котли, като смятането и подаването на проахо-газо-въздушната смес се осъществява посредством прахоприготвящи системи, монтирани непосредствено до пещните камери на котлите. Като спомагателно гориво (за разпалване на котлите) се използва природен газ и нискосернист мазут. В централата има инсталирани осем енергоблока, като първите 4 са дубъл блокове (два правотокови котела тип ПК-38-4 – турбина - генератор), а останалите са по схемата: котел с барабан (естествена циркулация) тип ЕП 670/140 – турбина - генератор. Очистването на димните газове след котлите от прах се осъществява от електростатични филтри, а от серен диоксид – чрез сероочистващи инсталации. Основните технически данни за котлите са показани в Табл.2.1.

Таблица 2.1.

	Котли ПК-38-4	Котли ЕП 670/140
Производител на котела	Русия-Подолски котлостроителен завод	Русия-Подолски котлостроителен завод
Вид на котела	Парен котел	Парен котел
Общ горивен капацитет	236 MW по комплексно разрешително	606 MW по комплексно разрешително
Размери на горивната камера	10,560 x 9,000 x 37,410m (бруто)	12,100 x 14,490 x 35,100m (бруто)
Обем на горивната камера	2306 m ³ нето	5300 m ³ нето
Налягане в горивната камера	- 2 до - 3 mbar в края на пещта	- 2 до - 3 mbar в края на пещта
КПД на котела	82,65 %	83,72%
Мощност на 1 горивна прахова уредба	59 MW	75,75 MW

2.2. Описание на разпалващата инсталация на котли ПК-38-4 и ЕП 670/140

Съществуваща мазутна инсталация

Съществуващата инсталация за разпалване на двата вида котли използва нискосернист мазут (леко котелно гориво). Горивото се доставя чрез ЖП транспорт до разтоварището за мазут. От там чрез помпи постъпва за съхранение в мазутни резервоари. Чрез други помпи мазута от резервоарите циркулира в тръбопровод до всеки котел и обратно до резервоарите, където се подгрява за да не замръзне.

Новоизградена разпалваща инсталация на природен газ

Газовата горивната инсталация в ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД е предназначена за изгаряне на природен газ при пусковите режими на котлоагрегатите. С въвеждането в експлоатация на разпалващата горивна уредба за работа с природен газ се цели оптимизация на пусковете - постигането на екологичен, ефективностен и икономически ефект. При изгарянето на природен газ не се отделят “мазни сажди” (отделят се при не пълното изгаряне на мазута), които водят до замърсяването на ЕФ. От тук следва, че при разпалване с газ, преди стартирането на първа прахова горелка, могат да се включват в работа ЕФ. Липсата на прахови частици и пепел в димните газове след ЕФ предпазва от износване димния вентилатор, а също така с включването на ЕФ се пуска в работа и СОИ.

2.3. Анализ на пусковите режими на котлите

Пускането в действие на енергиен парогенератор е един от най – отговорните и сложни не стационарни режими на работа. Анализът на пусковите режими с цел тяхната оптимизация, като цяло допринася за подобряване (ефективно, екологично, надеждно и други) на работата на котлите. Както вече стана ясно, по време на пусковите периоди на котлите в ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД се използва мазут като разпалващо гориво. В зависимост от топлинното състояние – студено, неизстинало и горещо, продължителността на пуска е различен, а от тук и разхода на разпалващо гориво. Топлинните състояния за пуск на котлите са следните:

- Горещо - $6 \div 10$ h
- Неизстинало - $6 \div 10$ до $70 \div 90$ h
- Студено - над $70 \div 90$ h

При всяко от тези състояния разхода на мазут е различен, поради спецификата на пусковите операции при всеки един от тях. Разходът на една мазутна горелка се определя на база количеството изразходен мазут, измерен от мазутно стопанство, и разделен на общото време на работа на всички работещи горелки, т.е. използва се формулата:

$$СЧР_m = \frac{В_m}{ГЧ}, \quad \text{където: } СЧР_m - \text{средно часов разход на мазут, t/h}$$

В_м - разход на мазут, t

ГЧ - време за работа на всички мазутни горелки, h

След анализ на всички пускове на ПГ за 2014г. и времето на работа на всяка мазутна горелка са определени съответно средна стойност от 1,5 t/h за мазутна горелка на котли ПК-38-4. След статистически анализ на броя на пусканията по котли и години за периода 2011 ÷ 2014 година, се наблюдава определена годишна повтораемост на „ситуациите“, като общия брой е в интервала $47 \div 80$ пуска годишно. Пресметнат е и е илюстриран т.н. „Изчислителен разход на мазут“ по време на пусковите операции за 2014 година, също така са синтезирани и представени обобщени „Пускови диаграми“ от студено и горещо състояние на котела с прилежащата му турбина. За тези два случая и е направен сравнителен анализ между тях. Установени са и описани са и съществени различия на пусковите схеми, алгоритми и диаграми за двата вида пуск на котлите. Обобщени характеристики за различията на тези диаграми са:

Средно време на пускане:

- за пуск от студено състояние – 750 min
- за пуск от горещо състояние – 160 min

Среден разход на мазут по време на пуска:

- за пуск от студено състояние – 50t
- за пуск от горещо състояние – 12t

2.4. Експлоатационни проблеми на ИВП на котли тип ПК-38-4

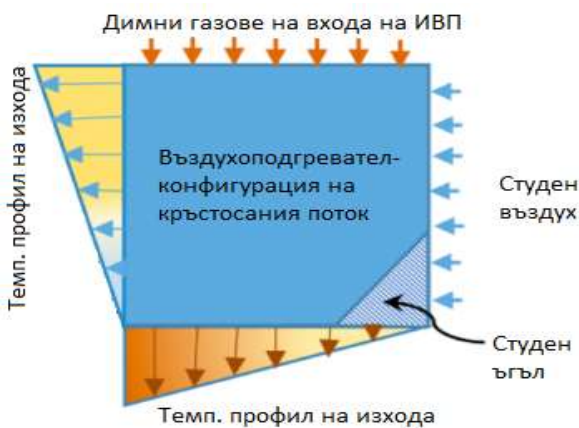
При разпалването на котлите с мазут, ЕФ може да се пусне известно време след спиране и на последната мазутна горелка. Сяроочистващата инсталация (СОИ) се включва след включването на ЕФ. Алгоритъма за пуск при използване на мазут, включва в работа ЕФ и СОИ след спиране изгарянето на мазут. Опростена схема на алгоритъма за пускане в работа котли РК-38-4 в “ТЕЦ Марица изток 2” ЕАД е показана на Фиг.2.1.



Фигура 2.1. Алгоритъм за пуск от студено състояние на котли ПК-38-4, при разпалване с мазут

В този случай, след спиране на изгарянето на мазут, котлите работят устойчиво само на въглища при номинални параметри. Температурата на ДГ в ПК са над 700 °С, а тези на изхода от ИВП над 170 °С.

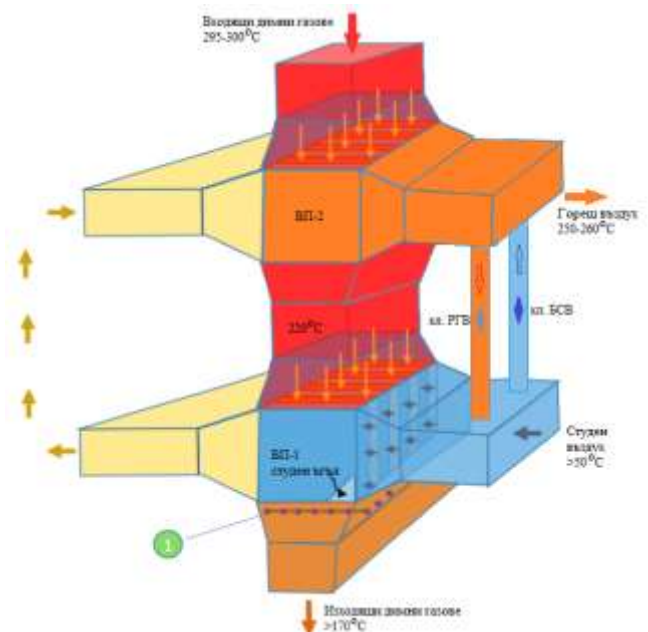
Организирано подаваният въздух за горене към всеки от котлите се подгръва в изнесен въздухоподгревател (ИВП). Тъй като той е последна нагревна повърхност по хода на димните



газове, съществува повишен риск от появата на нискотемпературна сярна корозия. Особено застрашен е ИВП при пускови режими, където температурите на димните газове и на въздуха, подаван за горене, са ниски. За да се избегне този неблагоприятен режим на работа на ИВП, трябва по сега действащата режимна карта, температурата на входа на въздухоподгревателя да са над 50÷55 °С. При пускови режими, поддържането на такива температури е трудно осъществимо.

Фигура.2.2. Температурен профил на потоците във ИВП

Заради конструктивни особености на ИВП е възможно в долния ъгъл, на страната от която постъпва студения въздух във въздухоподгревателя, да се получи зона с ниски температури на стените на тръбите. На Фиг. 2.2. са показани температурните полета на входа и на изхода от един въздухоподгревател на двата флуида – на въздуха и на димните газове. Температурния профил не е равномерен и за двата флуида. При показаните посоки на движение на въздуха и на газовете е възможно да се образува „студен ъгъл“ в долния десен ъгъл на въздухоподгревателя. Там температурите са най-ниски и се създават условия за кондензация на водните пари в димните газове.



Фигура 2.3. Принципно схема на ИВП на ПК-38-4

На Фиг.2.3. е показана принципна схема на ИВП на ПК-38-4 с температурите на флуидите, които преминават през него. Както вече беше споменато, по инструкция температурата на въздуха към ИВП не трябва да бъде по-ниска от 50-55 °С, а температурата на димните газове не трябва да бъде по-ниска от 165-170 °С. Именно тези две температури имат отношение към образуването на нискотемпературни зони в подгревателя. „Студения ъгъл“ в случая би се образувал в долната част на хоризонталния куб, където постъпва студения въздух. Практиката показва, че именно там се образуват първоначално налепи и отложения на пепел и прах. Веднъж започнали при подходящи условия, те се натрупват и пълзят все по-напред заради липсата на топлообмен в замърсените участъци и бавно изпълват междутръбното пространство на кубовете.

2.5. Конструктивно-технически проблеми на въздухоподгревателя на ПК-38-4 свързани със сярната корозия

Един от основните параметри, от който зависи безпроблемната работа на ИВП е температурата на студения въздух на неговия вход. По режимна карта и по инструкция на котли ПК-38-4 тези температура **не трябва да се понижава под 50÷55 °С**. Възниква въпроса: „Достатъчна ли е температура от 55 °С на входа на първа степен на ИВП, можем ли да я повишим и да я поддържаме достатъчно висока, без да се налага реконструкция на ИВП?“ За да се установи наличието на „студен ъгъл“ в ИВП (Фиг.7.2) е направено мрежово измерване на температурата на изходящите газове непосредствено след ИВП, на изхода от хоризонталните му кубове. За целта на измерването на температурите е избран ИВП- ляво на котел №5. Изградени са забори на три от стените на ИВП – фронт, ляво и дясно.

За целта на опитите е избран среден паров товар на котела от 200 t/h. Проведени са две измервания при еднакво натоварване на котела, като при първия опит температурата на студения въздух на входа е в границите на 50-55 °С, а на димните газове на изхода от подгревателя е около 170 °С. Схемата на работа на ИВП по време на двата опита е еднаква. За целта на опитите се променя само положението на клапата за рециркулация на горещ въздух. При второто измерване тази клапа е отворена на 100% с цел **максимално повишаване** на температурата на студения въздух на входа на подгревателя. Трябва да се вземе в предвид, че междутръбното пространство на хоризонталните кубове е забито и непроходимо за димните газове на разстояние около 0,7÷1,0 m от предната стена на ИВП (фронт). Това създава условия за по-ниски температури в близост до стената под непроходимата (подветрена) част на хоризонталния въздухоподгревател.

Резултати от проведените измервания

Направени са две мрежови измервания на температурите след ИВП-5 лев ръкав, в показаните на Фиг.8.18. ново изградени забори на фронт, лява и дясна стени. В двата случая имаме различни температури на студения въздух пред ИВП – при първото измерване е 54,4 °С, а при второто измерване е 64,5 °С.

Първи Опит (при $t_{в\text{ ивп}} = 55^{\circ}\text{C}$) - по време на първото измерване клапите към смесителите (кл.СМ), на рециркулацията (кл.РГВ) и на байпасите клапи (кл.БСВ) са отворени както е посочено в Табл.2.2.

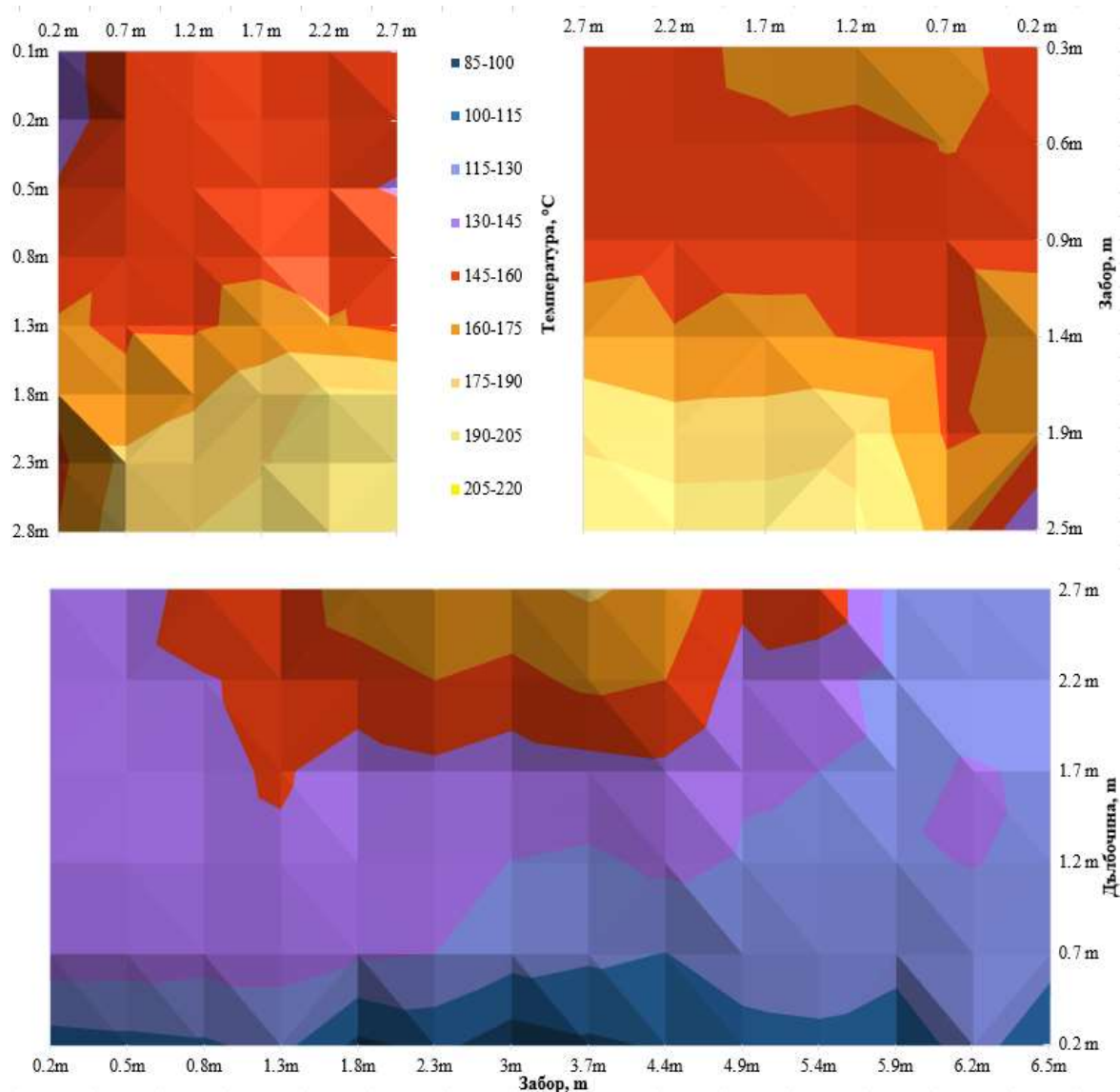
Таблица 2.2.

кл.СМ-А	кл.СМ-Б	кл.БСВ-А	кл.БСВ-Б	кл.РГВ-А	кл.РГВ-Б
0%	0%	27%	22%	49%	31%

Клапи РГВ са частично отворени за да се поддържа температура 55 °С, както е заложено в инструкцията за експлоатация на ИВП на котел ПК-38-4. Данните от измерването са обработени, изградени са контурни диаграми, показващи температурното поле на изходящите газове след първа степен на ИВП и са показани на Фиг.2.4. Това поле е след последна нагревна повърхност по пътя на газовете. Именно тук има най-голяма вероятност от образуването на нискотемпературна корозия. Средните температури на трите полета са:

- По цялата дължина на **фронт е 133 °C**
- По цялата дължина **тил е 165 °C** (ляво е 164 °C, дясно е 166 °C)

Наблюдава се голяма температурна неравномерност на полето на фронт. Тук ниските температури в първите две дълбочини се дължат главно на забитото междутръбно пространство на подгревателя от фронтната част на около 0,5÷1,0 m от стената.



Фигура.2.4. Температурно поле след първа степен на ИВП-ляво на ПК-38-4 при $t_{в\text{ ивп}} = 55^\circ\text{C}$

Само в една малка част от разглежданото поле температурите са над минималните изисквания от 142 °C. В останалата част от разглежданата половина на ИВП температурите са над необходимите, като средните са 165 °C, а максималните температури тук достигат 200 °C. Въпреки по-високите температури, и тук в двата ъгъла на стената от към тил са налични условия за „студен ъгъл“.

Втори Опит (при $t_{в\text{ ивп}} = 65^\circ\text{C}$) - по време на второто измерване клапите към смесителите (кл.СМ), на рецикулацията (кл.РГВ) и на байпасите (кл.БСВ) са отворени както е посочено в Табл.2.3.

Таблица 2.3.

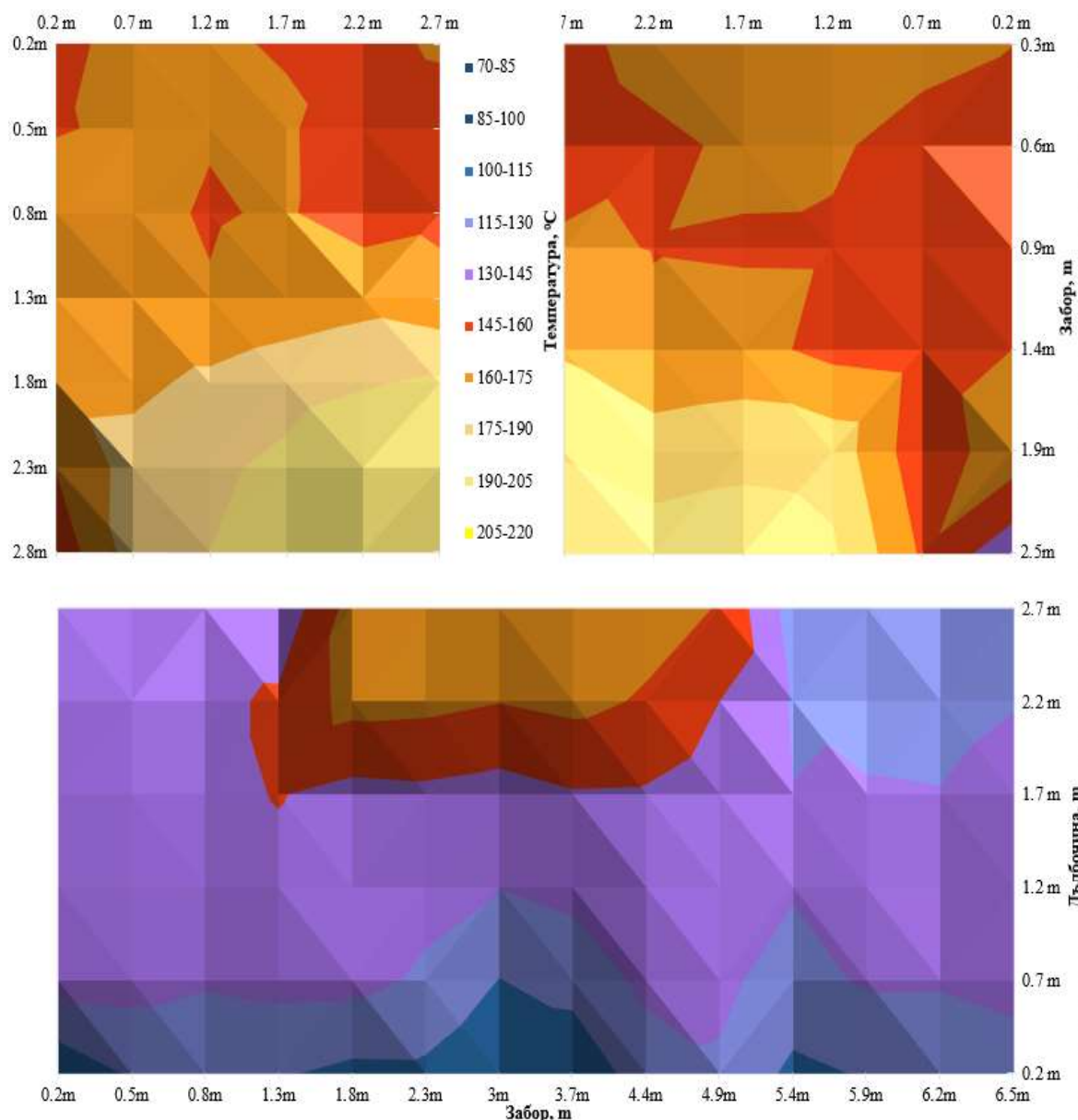
кл.СМ-А	кл.СМ-Б	кл.БСВ-А	кл.БСВ-Б	кл.РГВ-А	кл.РГВ-Б
0%	0%	27%	22%	100%	71%

Направен е опит с клапа РГВ-ляво, която е отворена на 100%. Целта е да се изследва до колко ще се повиши температурата на въздуха пред ИВП, като едновременно с това се следи $t_{\text{иг}} < 190^\circ\text{C}$. В случая, при този паров товар на котела, за да се повиши температурата на въздуха пред подгревателя над 55°C остава около 1/3 от регулиращата способност на клапата. Температурата се повишава само с около 10°C и достига $t_{\text{в ИВП 'ляво}} = 64,5^\circ\text{C}$.

Данните от измерването са обработени, изградени са контурни диаграми, показващи температурното поле на изходящите газове след първа степен на ИВП и са показани на Фиг.2.5. Това поле е след последна нагревна повърхност по пътя на газовете. Именно тук има най-голяма вероятност от образуването на нискотемпературна корозия. Средните температури на трите полета са:

- По цялата дължина на **фронт** е **135°C**
- По цялата дължина **тил** е **169°C** (ляво е 171°C , дясно е 166°C)

Аналогично на първия опит и тук се наблюдава голяма температурна неравномерност на полето на фронт – ниските температури в първите две дълбочини се дължат главно на забитото междутръбно пространство на подгревателя от форнтова част на около $0,5 \div 1,0\text{ m}$ от стената.



Фигура 2.5. Температурно поле след първа степен на ИВП-ляво на ПК-38-4 при $t_{\text{в ИВП 'ляво}} = 65^\circ\text{C}$

През тази част не преминават горещи димни газове и температурите са изключително ниски. Съпоставимо с първото измерване, само в една малка част от разглежданото поле температурите са над минималните изисквания от 145 °С. В останалата част от разглежданата половина на ИВП температурите са над необходимите, като средните за цялото поле са 169 °С, а максималните температури тук достигат 202 °С. Въпреки по-високите температури, тук в десния ъгъл на стената от към тил все още са налични условия за „студен ъгъл“. При повишение на $t_{в\text{ ИВП}}$ с около 10 °С до $t_{в\text{ ИВП}}^{\text{ляво}}=64,5\text{ °С}$ се повишават средните температури главно на тил с около 5 °С. Цялостната картина на контурните диаграми е по-добра. Също така в левия ъгъл на тил вече няма предпоставка за образуване на „студен ъгъл“.

ГЛАВА ТРЕТА

Аналитични изчисления на емисиите генерирани при пускови режими от котли тип ПК-38-4

3.1. Методика за изчисляване на въглеродните емисии

Котлите в ТЕЦ „Марица изток 2“ ЕАД преминават от един вид разпалващо гориво, в случая мазут, към друг вид разпалващо гориво – по екологичния природен газ.

За изчисляване на количеството на емисиите от CO₂, образувани от горивните процеси по време на разпалването на котлите при изгаряне на мазут, природен газ и въглища могат да се използват стехиометричните съотношения на окисление на въглерода, а също така може да се използва и изчислителната методика по Регламент 601/2012. При тази методика количеството на изгореното гориво на база долната топлина на изгаряне се умножава със съответния емисионен фактор и по съответния коефициент на окисление. Разгледан е случая със стехиометричните съотношения свързани с окисление на въглерода при използването на гориво мазут:



При пълното окисление на 1kg C се получават 3,67kg CO₂. За изчисление на въглеродните емисии ще използваме формулата:

$$E_{\text{CO}_2} = 3,67 \cdot C^r \cdot M, [\text{kg}] \quad \text{където: } E_{\text{CO}_2} - \text{количество на въглеродните емисии, kg/h}$$

C^r – количество на въглерода в горивото на работна маса, %
 M – масов часов разход на гориво през една горелка, kg/h

При изчисление на въглеродните емисии от природен газ се използват стехиометричните съотношения свързани с окисление на метан:



При пълното окисление на 1kg CH₄ се получават 2,75kg CO₂ и 2,25kg водни пари.

За изчисление на въглеродните емисии ще използваме формулата:

$$E_{\text{CO}_2} = 2,75 \cdot M, [\text{kg}] \quad \text{където: } E_{\text{CO}_2} - \text{количество на въглеродните емисии, kg/h}$$

M – масов часов разход на гориво през една горелка, kg/h

За изчисление на водните пари използваме формулата:

$$W_{\text{пара}} = 2,25 \cdot M, [\text{kg}] \quad \text{където: } W_{\text{пара}} - \text{количество на водната пара, kg}$$

M – масов разход на гориво за периода на пуск, kg

При метана също може да се използват стехиометричните съотношения свързани с окисление на въглерода, като се има в предвид, че съдържанието на въглерод в метана е 75 % мас.

Съдържанието на въглерод в използваното за пусковите операции на котлите течно гориво (мазут), природен газ (метан) и основното гориво - лигнитни въглища, необходимо за настоящите изчисления са показани в Табл.3.1.

Таблица 3.1.

При окислението на въглерода в използваното гориво за пусковите операции на котлите (по методиката в т.3.1), количеството на въглеродните емисии е по-голямо при мазута спрямо това при окислението на природния газ. На пръв поглед съдържанието на въглерод в природния газ (75 % мас.) е по-малко от това на мазута (87%), но за получаването на едно и също количество топлина, се изразходва по-голямо количество природен газ отколкото мазут. Тук трябва да се отбележи, че тези сметки са при окисление на всичкият въглерод в горивото.

Характеристики на горивото			
	Мазут	Въглища	Природен газ
C, % мас.	87	20,3	75

Според изискванията на Регламент 601/2012, след като не може да се определи колко от количеството въглерод се окислява, се прима, че се окислява цялото количество въглерод. Данните от изчисленията са систематизирани в графичен вид във Фиг.1.1. Намалението на CO₂ емисиите получени при разпалване на котлите с природен газ е с приблизително 25% по-малко от тези при използване на мазут.

3.2. Методика за изчисляване на серните емисии

Недопустимите замърсявания на околната среда със серни окиси и прах при пусковите режими на котлите се дължат на ограничената работа на ЕФ и СОИ поради наличие на мазни сажди в димните газове от изгарянния за разпалване мазут. Поради това СОИ не работи и това налага димните газове по време на пуска да постъпват в атмосферата без да бъдат пречистени.

За изчисляване на количеството на емисиите от SO₂, образувани от горивните процеси по време на разпалването на котлите при изгаряне на мазут и въглища, са използвани стехиометричните съотношения свързани с окисление на сярата:



При пълното окисление на 1kg S се получават 2kg SO₂. За изчисление на серните емисии ще използваме формулата:

$$E_{SO_2} = 2S^r \cdot M, [\text{kg}]$$

където E_{SO₂} – количество на серните емисии, kg/h

S^r – количество на сярата в горивото на работна маса, %

M – масов часов разход на гориво през една горелка, kg/h

Таблица 3.2.

Характеристики на горивото		
	Мазут	Въглища
Q _f , MJ/kg	40,7	6,527
S, %	0,82	2,4
A ^r , %	0,006	17,7

Характеристиките на използваното течно гориво (мазут) и твърдо гориво (лигнитни въглища), необходими в настоящите изчисления са показани в Табл.3.2.

Разходът на твърдо гориво е номиналният за една прахоприготвяща система (ППС), а разходът на течно гориво е средния разход, изчислен на база статистически пресмятания. Съответните стойности за горивните уредби на котли ПК-38-4 са показани Табл.3.3.

Таблица 3.3.

Разход на горелките		
	Мазутна горелка	Прахова горелка
F, kg/h	1 500	45 000

За изчисляване на количеството на емисиите от SO₂, образувани от горивните процеси по време на разпалването на котлите ПК-38-4 при изгаряне на мазут и въглища, е използвана методиката по-горе.

Таблица 3.4.

Часовите емисии на SO₂ в резултат на работата на една мазутна и една прахова горелка (по време на пуск) са показани в Табл.3.4. Наблюдава се много голяма разлика в количеството на емисиите от SO₂, генерирани при изгаряне на мазут и при изгаряне на въглища. Това се дължи от една страна на по-голямото съдържание на сярата във въглищата – около 2,4 %, докато

Гориво		Мазут	Въглища
Емисии	Емисии		
	E _{SO₂} , kg/h	24,6	2 160

Таблица 3.5.

Гориво Емисии	Мазут		Въглища	
	горещо	студено	горещо	студено
Es _{SO₂} , t	0,2	0,9	11	40

съдържанието на сяра в мазута е доста по-малко – около 0,8 %. От друга страна изразходваното количество въглища от една прахова горелка е около 30 пъти по-голямо от това на една мазутна горелка (Табл.3.3.).

Делът на SO₂ емисиите дължащи се на изгаряне на мазут е незначителен в сравнение с тези от изгарянето на въглищата (около 1%). Количеството на серните емисии от студено и горещо състояние за двата вида котли е показано в Табл.3.5.

3.3. Анализ на праховите емисиите от пусковите режими на котлите

Относно другия вид емисии, количеството на пепелта получена при горивния процес представлява 17,7% от масата на изгорените въглища. Част от тази пепел пропада в шлаковата вана (ШВ), друга част се отделя в пепелните бункери под конвективна шахта (КШ) и изнесения въздухонагревател (ИВП), като най-голямо количество се отделя в ЕФ. Опитно е установено, че количеството пепел на неговия вход е 87% от цялото количество, съдържащо се в горивото. Другата част пропада в ШВ – около 10%, под КШ и под ИВП – около 3%. При работещи агрегати на ЕФ неговата ефективност е над 99,9%, като емисиите прах след него са под изискваните нормативи (50 mg/Nm³). При пуск обаче, агрегатите на ЕФ не работят и неговата ефективност намалява. От проведените режимно-настроечни изпитания на ЕФ е установено, че количеството пепел, което пропада под ЕФ, при неработещи агрегати е в границите от 63% до 76%. Това означава, че при пускови операции, само определен процент от пепелта постъпва директно в атмосферата.

Количеството емисии прах (E_{прах}, kg) ще получим от следната зависимост:

$$E_{\text{прах}} = \frac{A^r}{100} \cdot M^r \left(\frac{100 - \eta_{\text{еф}}^{\text{off}}}{100} \right) \cdot \frac{A'_{\text{еф}}}{100}, \text{ kg},$$

където: A^r – пепелно съдържание на въглищата на работна маса, %

M^r – количеството на въглищата на работна маса, kg

η_{еф}^{off} – ефективност на ЕФ при изключени агрегати, %

A'_{еф} – количествен дял на пепелта пред ЕФ, %

За стойността на η_{еф}^{off} във формулата са използвани по-малките стойности, за да се представи възможно най-лошия сценарий за околната среда. В следващата Табл.3.6. са представени количеството емисии прах, отделени в атмосферата за пуск на ПК-38-4, за всеки от двата типа ЕФ.

Таблица 3.6.

Маса на емисиите	ЕФ	ЭГА 2-58-12-6-4 (ПК-38-4)	УГ 3-4-177 (ПК-38-4)
	Пуск		
E _{прах} , kg	Студено състояние	45 828,3	52 987,3
	Горещо състояние	10 902,7	12 605,8

И при двата вида ЕФ на ПК-38-4, количеството на праховите емисии е по-голямо при пуск от студено състояние. От горещо състояние е в пъти по-малко, но и периодът, необходим за пуск, е по-кратък.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА

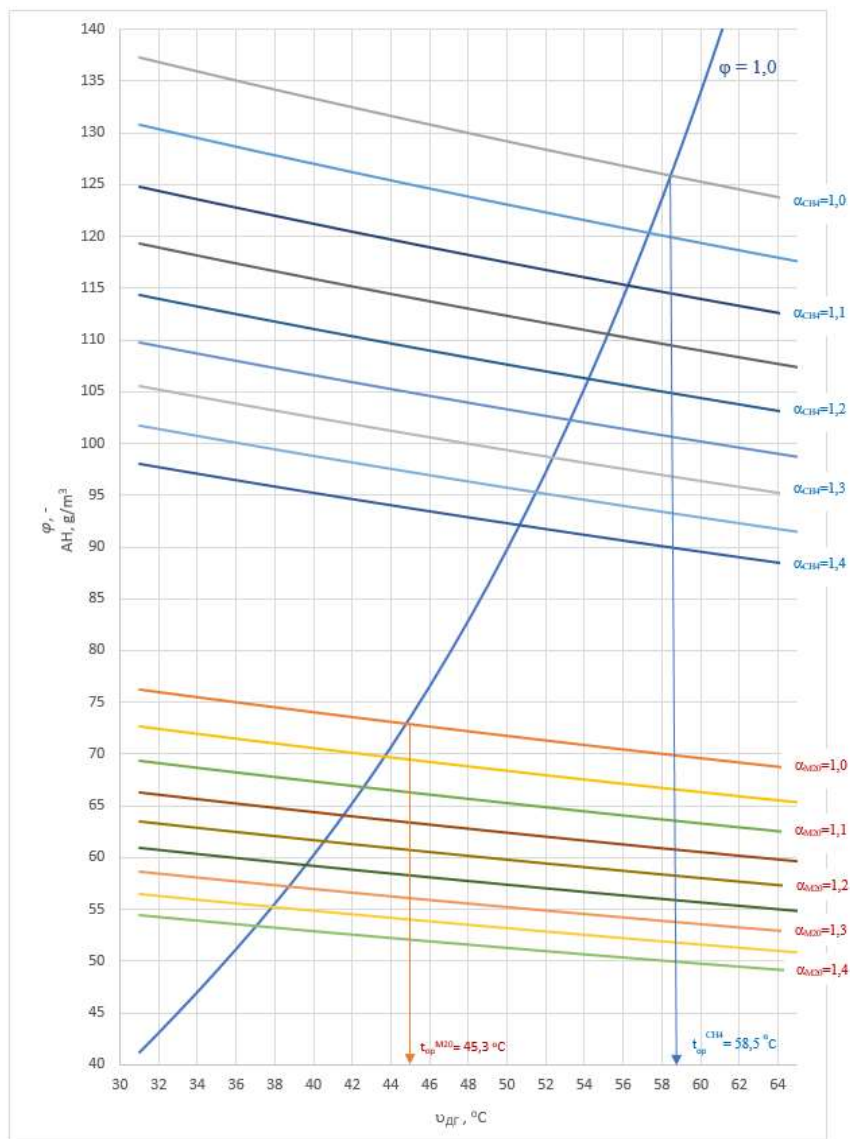
Определяне на точката на оросяване на димните газове на изхода от ИВП

4.1. Определяне на точката на оросяване в Първи режим на работа на ИВП (изгаряне само на метан/мазут)

За да определим точката на оросяване на димните газове, трябва да знаем какво е количеството на водните пари което може да се разтворят в тях. Температурата на оросяване на димните газове, зависи и от концентрацията на въглероден диоксид CO₂ в тях. Максималната

концентрация на CO_2 в димните газове се получава при коефициент на излишък на въздуха $\alpha=1$ и пълно изгаряне на горивото. За изгаряне на Мазут Марка 20 $\text{CO}_{2\text{max}}=15,6834\%$, а при изгаряне на Метан CH_4 $\text{CO}_{2\text{max}}=11,736\%$. При реален горивен процес винаги имаме $\alpha>1$. Това означава, че в димните газове ще имаме по-ниска концентрация на CO_2 в тях.

- При изгаряне на 100 % метан, температурата на оросяване на димните газове е $58,5^\circ\text{C}$ ($\alpha=1$).



($\alpha=1$).

- При изгаряне на мазут М 20, температурата на оросяване на димните газове е $45,3^\circ\text{C}$ ($\alpha=1$).

- С увеличаване на коефициентът на излишък на въздух, концентрацията на въглероден диоксид в димните газове намалява и при двете горива, а с това намалява и температурата при която настъпва кондензация на водните пари в димните газове. Винаги обаче тя остава по-висока при изгарянето на CH_4 в сравнение с изгарянето на мазут М 20.

При изгарянето на 1 kg мазут Марка 20 се генерират 1233 g водни пари, а от 1 m^3 CH_4 – 1608 g. Промяната на коефициентът на излишък на въздух практически не оказва влияние върху количеството генерирани водни пари от горивото.

Фигура 4.1. Изменение на абсолютната влажност на димните газове спрямо тяхната температура при изгаряне на мазут М 20 и метан CH_4

В зависимост от температурата на димните газове и от коефициентът на излишък на въздух в тях, получаваме различна абсолютна влажност. На Фиг.4.1. е изобразена кривата при която имаме насищане на водните пари ($\varphi = 1$) и абсолютната влажност на димните газове при изгаряне на мазут М20 и CH_4 . От Фиг.4.1. можем да направим следните изводи:

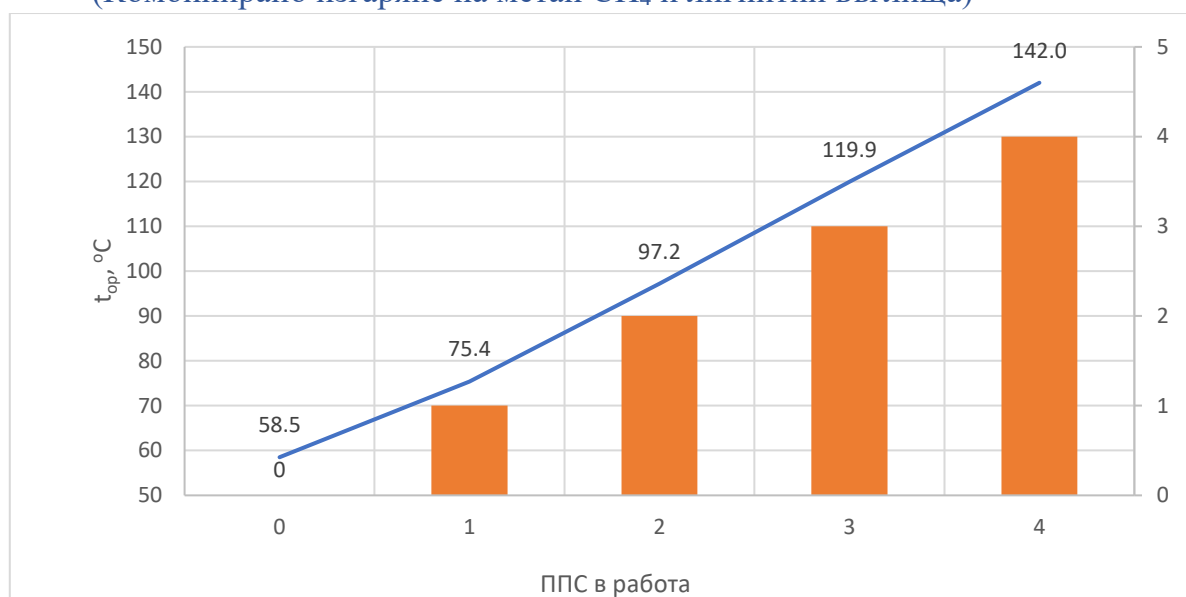
Горната група линии се отнасят за изменението на абсолютната влажност при изгарянето на метан CH_4 . Най-горната от тях е при $\alpha=1$, а най-долната при $\alpha=1,4$.

- Долната група линии се отнасят за изменението на абсолютната влажност при изгарянето на мазут М 20. Най-горната от тях е при $\alpha=1$, а най-долната при $\alpha=1,4$.
- Линията която показва насищането на димните газове с водни пари $\varphi = 1$ преминава през всички останали линии и ги разделя на две зони:

- **На дясно от линията $\varphi = 1$** – Ако температурата на димните газове и коефициентът на излишък на въздуха са такива, че работната точка се пада на дясно от $\varphi = 1$, тогава ние се намираме в зона в която $\varphi < 1$ и димните газове имат температура по-висока от температурата на оросяване.
- **На ляво от линията $\varphi = 1$** – Ако температурата на димните газове и коефициентът на излишък на въздуха са такива, че работната точка се пада на ляво от $\varphi = 1$, тогава ние се намираме в зона в която $\varphi > 1$ и димните газове имат температура по-ниска от температурата на оросяване. В този случай, в димните газове се появяват водни капки.

За едни и същ коефициент на излишък на въздух температурата на оросяване на димните газове, при изгаряне на метан CH_4 , е с около 12°C по-висока, отколкото при изгарянето на мазут М 20.

4.2. Определяне на точката на оросяване при Втори режим на работа на ИВП (Комбинирано изгаряне на метан CH_4 и лигнитни въглища)



Фигура 4.2. Изменение на температурата на оросяване на димните газове в зависимост от броя на ППС в работа

При пускови режими на Котли тип ПК 38-4, има момент, когато едновременно се изгарят метан и лигнитни въглища. При едновременното изгаряне на въглища и метан имаме три различни варианта на работа – с една, с две и с три прахоприготвящи системи (ППС). Пресметнат е процентния дял на отделните газове в димните газове за всеки от трите случая на едновременно изгаряне на лигнитни въглища и на метан. На базата на концентрацията на водните пари и серните оксиди в димните газове е определена температурата на оросяване при изгарянето на различна смес от метан и лигнитни въглища. Резултатите са представени в графичен вид на Фиг. 4.2.

4.3. Критерий за безопасна работа на ИВП

Трябва да определим критерий който да следим за безопасна работа на ИВП при различните му експлоатационни режими. Такъв критерий, който да оцени безопасната на работата на ИВП е **температурата на метала** на стената на първите кубове на ИВП по хода на въздуха. **За да нямаме корозионни процеси в ИВП, трябва температурата на метала да бъде ВИНАГИ ПО-ВИСОКА** от температурата на оросяване за дадения режим на работа. Температурата на стената на метала от към газова страна (страната на димните газове) зависи от две температури:

- Температурата въздуха в ИВП;
- Температурата на димните газове в ИВП

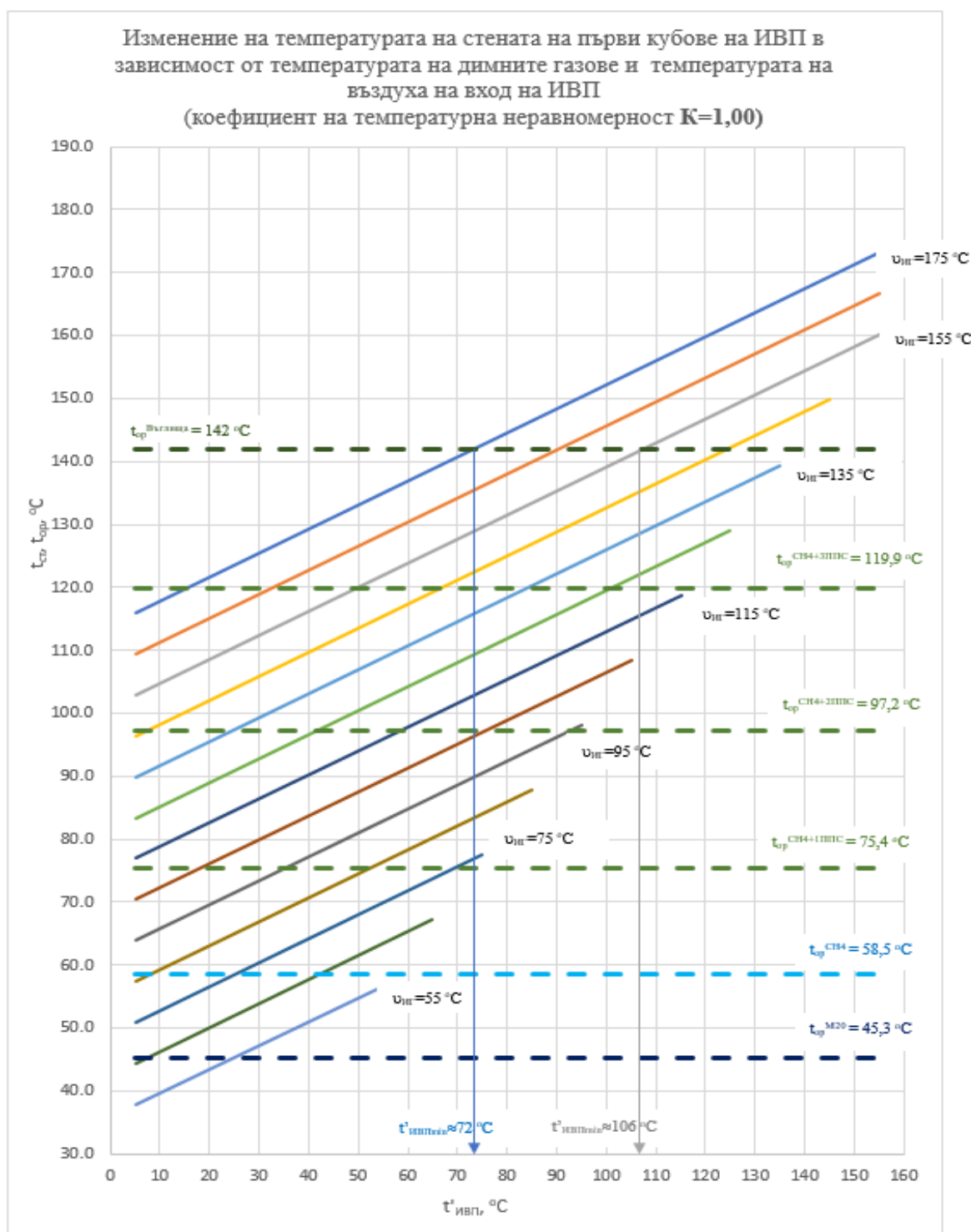
Най-проблемната зона за ИВП е входът на ИВП по въздух, който се явява и изход от ИВП по димни газове. Коефициента отчитащ неравномерността на температурата на изходящите димни газове (**K**) от ИВП може да заема стойности от $K=1$ до $K=0,8$. В Табл.4.1. е даден пример, каква би била температурната неравномерност при различни стойности за **K** и средна температура на изходящи газове от 175 °C.

Таблица 4.1.

Величина	Озн.	Дим	Коеф. на температурна неравномерност				
			$K=1,00$	$K=0,95$	$K=0,90$	$K=0,85$	$K=0,80$
Средна температура на изходящи ДГ	$\vartheta_{иг}$	°C	175,00	175,00	175,00	175,00	175,00
Отклонение	$\Delta\vartheta_{иг}$	°C	± 0,00	± 8,75	± 17,5	±26,25	±35,00
Минимална стойност на ДГ	$\vartheta_{иг}^{min}$	°C	175,00	166,25	157,50	148,75	140,00
Максимална стойност на ДГ	$\vartheta_{иг}^{max}$	°C	175,00	183,75	192,50	201,25	210,00

От данните представени в Табл. 4.1. е видно, че когато **K=1,00** имаме идеален случай и при него нямаме никаква неравномерност на температурното поле на димните газове на изхода от ИВП. В действителност това не е така и **K** има стойности по-малки от 1. Причините за появата на неравномерност могат да бъдат: конструктивни и експлоатационни. Конструктивните отчитат особености в конструкцията на ИВП. Експлоатационните отчитат техническото състояние на ИВП, като: забити тръби на кубовете; нарушена цялост на тръби в кубовете и др. Колкото е по-малък коефициентът на температурна неравномерност **K**, толкова имаме по-голяма разлика между минималната и максималната стойност на температурата на изходящи димни газове.

При пресмятането на минимално допустимата температура на стената на метала от към газова страна на последните по хода на димните газове кубове се взема минималната температура на димните газове при даден коефициент на температурна неравномерност. Фигура 4.3. е построена при топлинна неравномерност $K=1$.



Фигура 4.3.

Обобщение на част от представените резултати за изменение на минималната температура на въздуха на входа на ИВП в зависимост от коефициентът на температурна неравномерност на димните газове са обобщени във табличен вид в Табл.4.2.

Таблица 4.2.

Температура на димните газове $t_{дг}$, °C	Коефициент на неравномерност на температурата на димните газове K , -				
	1	0,95	0,9	0,85	0,8
175 °C	72 °C	88 °C	105 °C	118 °C	134 °C
165 °C	90 °C	104 °C	118 °C	132 °C	146 °C
155 °C	106 °C	122 °C	135 °C	146 °C	160 °C

ГЛАВА ПЕТА

Изготвяне на нови алгоритми за пуск на котел тип ПК-38-4 при използване на природен газ като разпалващо гориво

5.1. Използване на CFD програми за решаване на инженерни и изследователски проблеми

С развитието на изчислителните възможности на съвременните софтуерни и хардуерни продукти е възможно все по-коректно и достоверно пресъздаване на физико-химията на сложните процеси, настъпващи при горивните процеси в пещите на енергийните парогенератори. Налагането на симулационните модели като технологична мярка за изследване на факторите, влияещи върху горенето и анализа на резултатите, се обуславя с трудоемкостта и дори в някои случаи невъзможността за осъществяване на натурни изпитания, което превърна използването на цифрови симулационни модели в необходим етап от процеса на решаване на изследователски задачи. Позитивите от използване на този съвременен инструментариум са известни:

- Съкратено време за получаване на резултати при числовите експерименти.
- Увеличен обем и многообразие на планираните експерименти, възможност за създаване на ситуации (гранични условия), които при натурни изпитвания са невъзможни.
- Многократно по-голяма информация (като обем, вид и брой на регистрираните параметри и др.), получена в резултат на тези експерименти.
- По-големи възможности за избор на начина на представяне на информацията (Таблично, графично, цветово и др.) и за допълнителни обработки на тази първична информация.
- Заместване на скъпоструващи натурни експерименти с участието на голям брой специалисти и работа в нездравословна среда.

Цифровото моделиране на технологични процеси намира все по-широко приложение в научно-изследователската и развойно-внедрителската работа. Използваният в настоящия материал програмен продукт (ANSYS CFX) има широка степен на приложимост в инженерната практика, свързана най-вече с турбулентни и ламинарни течения, топлообмен, както и моделиране на многофазови потоци, горивни процеси и др.

5.1.1. Описание на програмен продукт ANSYS

Специализираният софтуер ANSYS е програмен продукт, работещ под WINDOWS. Тази среда е създадена за симулационно моделиране на ламинарни и турбулентни потоци, топлообмен, както и в съчетание с допълнителни модели като например такива за многофазови потоци, горивни процеси и др.

Комплексът ANSYS включва два основни модула:

- Модул за създаване на геометрични структури и изчислителни решетки, наречен ICEM.
- Модул за прилагане на изчислителна механика на флуидите (CFD), наречен CFX, съдържащ три подмодула:
 - **Pre-processor (предварителен процесор);**

В този модул са включени геометрични и мрежови генератори. Геометричните генератори се използват за дефиниране на геометричните области – конкретните конструктивни особености

на обекта за изследване, а мрежовите създават мрежа, която може да бъде равномерна или неравномерна.

- **Solver Module (блок за решение);**

CFX-4 “Solver” се състои от следните части:

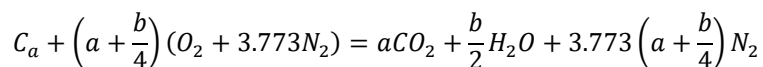
- “Frontend” модул – използва за преобразуването на входната информация на дадена задача от форма удобна за работа на потребителя, във форма необходима за ефикасно решение от програмата.
- “Solution” модул – “Solution” модул – това е изчислителния механизъм на програмата. След въвеждане на граничните и началните условия се преминава към модула за изчисление. При достигане на условията за сходимост на решението модулет прекратява сметките и генерира резултативен файл.

- **Post-processing (представяне на резултатите).**

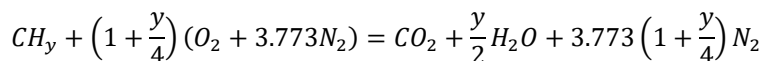
Резултатите от направеното моделно изследване се получават в текстови и в графичен вид. Данните от текстовия файл дават подробна информация за резултатите от пресмятанията на всяка итерационна стъпка, както и обобщени данни за цялостното пресмятане, като например:

5.1.2. Модел на изгарянето на метан в пешна камера на котела

За изчисления на процеси на горене, които изгарят въглеводородно гориво, ANSYS предоставя лесен начин за задаване на първоначалния състав на инертния поток. Инертният състав може да бъде зададен чрез приемане на съотношение на водород към въглерод в следната обща реакция на окисление:



което може да бъде пренаписана по отношение на съотношението на водород към въглеродни атоми ($y=b/a$) в горивото като:



Ако уравнение (3.42) се реши за масовите фракции на CO_2 , H_2O и N_2 , се получават следните отношения:

$$Y_{CO_2} = \frac{44.01}{y_{tot}} \quad Y_{H_2O} = \frac{9.01y}{y_{tot}} \quad Y_{N_2} = \frac{426.56192y + 106.24768}{y_{tot}}$$

където: $y_{tot} = 35.57192y + 150.25768$

Задаването на съотношението Н/С предполага, че изгореният газ е резултат от пълното стехиометрично изгаряне на това въглеводородно гориво и единствените продукти на горенето са CO_2 , H_2O и N_2 . В интерфейса може също да бъде зададен произволен състав за инертния поток.

5.2. Аеродинамично изследване на потоците в газовите горелки, инсталирани на котлите в ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД

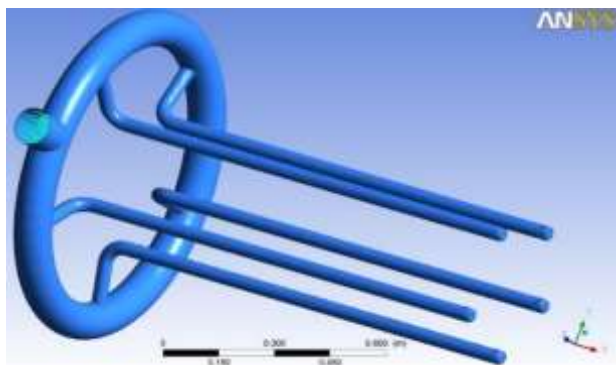
Изследването на газовата горелка е наложено след стартиране на пилотната инсталация за замяна на мазута като разпалващо гориво с природен газ на котел №6 (ПК-38-4). След проведени пусково-настроечни мероприятия и преминаване към основното гориво – въглища, се стига до спиране на котела в следствие от недостиг на високи температури в пешната камера. По време на пусковите операции за този пуск се използват пет газови горелки, всяка от които е с проектен номинален разход от $1800 \text{ Nm}^3/\text{h.}$, което като топлинна мощност е достатъчно да се извърши пускът на горелки на въглища. Необходимо е да се установят причините за недостига на

достатъчно високи температури в печната камера (при работа на пет газови горелки) и невъзможността да се премине безпроблемно към основното гориво.

За целта са направени:

- моделни изследвания на газовия тракт на инсталираните газови горелки;
- моделни изследвания на разхода и разпределението на въздуха в горелката.

Моделно изследване на разхода на газ през горелката



Изследването на газовата горелка чрез софтуер за моделно изследване (ANSYS CFX) се налага да започне с газовата част на самата горелка – колекторът за газ и т.нар. „пушки“, които доставят природния газ за смесване с въздуха и изгаряне в печна камера на котела. На Фиг. 5.1. е представен модел на колекторът и „пушките“, който ще се използва за целите на моделирането.

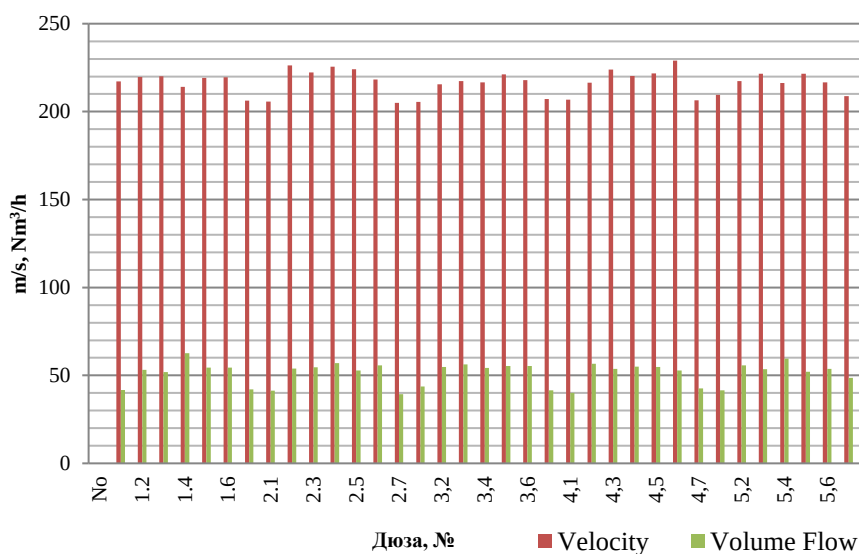
Фигура 5.1. Газова горелка (газова част)

В следващата Табл.5.1. са показани резултатите от направената симулация при номинален разход от 0,357 kg/s [1800 Nm³/h] на входа на горелката.

Таблица 5.1.

Входни данни – 0,357kg/s [1800 Nm ³ /h]				
Резултати	Масов поток, kg/s	Площ, m ²	Скорост, m/s	Плътност, kg/m ³
Вход	0,357	0,0087	45,06	0,92
Изход	0,357	0,0016	216,6	0,79

От проведеното моделно изследване се наблюдава, че материалния баланс на входа и на изхода е еднакъв – т.е. моделът отговаря на критериите за сходимост. Промяната на скоростта на изтичане на флуида е над 4 пъти по- висока на изхода от дюзите, спрямо тази на входа към колектора. Това се дължи на по-малката обща площ на изхода спрямо входа с над 5 пъти. Следва да се разгледа разпределението на горивото през дюзите на горелката – неговото количество и скорост. Изградена е графика с тези параметри за всяка дюза. Наблюдава се почти еднакво



разпределение към съответните дюзи на всяка „пушка“ (Фиг.5.2). Скоростта и дебита са по- малки на първата и последната дюза за всяка „пушка“, което е в резултат на по- малкия ѝ диаметър. Изводът е, че разпределението на газа е равномерно, а отклонението на по-отдалечените газови „пушки“ от входа на газа към колектора е в пренебрежимо малки граници.

Фигура 5.2. Скорост и обемен разход на природен газ през дюзите на ГГ

Моделно изследване на разхода на въздух за горене към горелката

Въздухът, необходим за изгарянето на природния газ към ГГ се доставя чрез въздушна кутия, която е разделена на две зони. Първата зона доставя първичен въздух, минава през завихрител, след който завихрения въздух се удря с напречно движещия се природен газ и способства за образуването на силно турбулизирана струя от въздух и газ на изхода от ГГ. Там се образува първичната зона на горене. Въздухът от втората зона на въздушната кутия навлиза надлъжно на факела на ГГ и образува вторична зона на горене. При създадения модел използваме за входни данни посоченото от проектантът количество въздух, който е достатъчен за пълното изгаряне на горивото. Получените резултати са показани в Табл.5.2.

Таблица 5.2.

За да се получи икономично и ефективно изгаряне на природния газ трябва да се добави ограничено количество въздух за горене, т.е. с нисък излишък на въздух. Това от друга страна обуславя образуването на зони с недостиг на кислород. За

Вход: 25 336 Nm ³ /h, t _{AIR} = 25 °C; Изход: Отворен (статично налягане = 0 Pa)			
	Вход	Първичен въздух	Вторичен въздух
Площ, m ²	0,42	0,054	0,12
Масов дебит, kg/s	9,1	1,6	7,5
Скорост, m/s	18,28	33,9	56,3
Обемен дебит, Nm ³ /h	25 336	4463	20 873

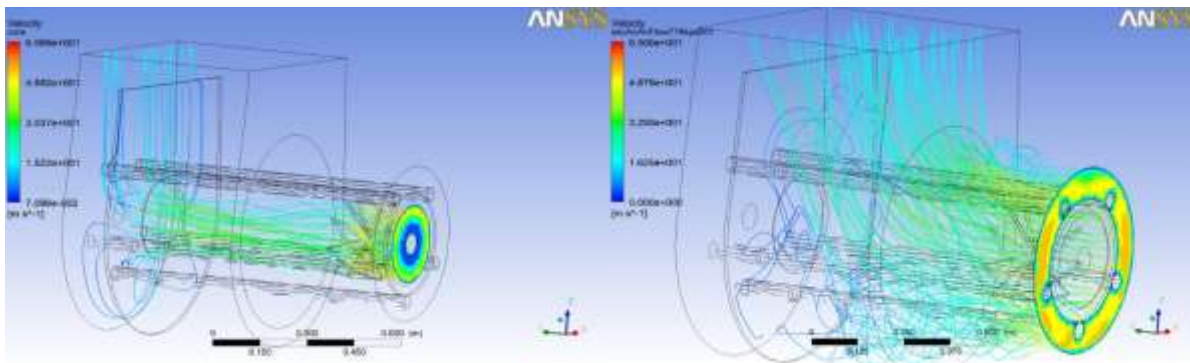
интензифициране на горенето е необходима висока турбулентност в ядрото на факела и зоната на доизгаряне. До тук това е изпълнено чрез разбиване на газовия факел на отделни малки струи от 35-те дюзи на газовите „пушки“ и движещия се на 90 градуса спрямо струите газ завихрян въздух, като в същото време трябва да се поддържа умерена турбулентност в периферните пластове на корена на факела за по добро запалване. При проверка се оказва, че количеството на подавания въздух към въздушната кутия е надстехиометричен, при $\alpha=1,4$. Тази стойност е доста висока при изгаряне на природен газ. Скоростите на изтичане на въздуха през горелката (Табл. 5.2) са доста високи, като скоростта на вторичния въздух от 56 m/s, способства за разкъсване на факела, а и повисокото му количество допринася за допълнително охлаждане на пешната камера. Вzeti са мерки за намаляване на въздуха при $\alpha=1,2$. Направена е симулация с новото количество въздух на входа 21 606 Nm³/h. Резултатите са показани в Табл.5.3.

Таблица.5.3.

С намаляване на коефициента на излишък на въздух на $\alpha=1,2$ се постига намаляване на общото количество въздух с 15%, спрямо стойностите при $\alpha=1,4$. Редуцирането на скоростите на изтичане на

Вход: 21 606 Nm ³ /h, t _{AIR} = 25 °C; Изход: Отворен (статично налягане = 0 Pa)			
	Вход	Първичен въздух	Вторичен въздух
Площ, m ²	0,42	0,054	0,12
Масов дебит, kg/s	7,76	1,366	6,394
Скорост, m/s	15,589	28,9	48,2
Обемен дебит,	21 606	3 803	17 802
Обемен дебит,	21 606	3 803	17 802

първичен и вторичен въздух е съответно на 28,9 m/s и 48,2 m/s, което също е с около 15%. При тези стойности на скоростта на вторичния въздух не се образуват зони на разкъсване на факела. Топлинното натоварване на нагревните повърхности се увеличава. Така за нуждите на един пуск се използват 4 ГГ, което съвпада с пусковете на мазут.



Фигура 5.3. Аеродинамичен модел на първичен и вторичен въздух на ГТ (21 606 Nm³/h)

След направените изследвания на газовата горелка с въздушната и кутия се стига до извода, че надстехиометричното съотношение на въздух ($\alpha \geq 1,4$) и газ е причината за ниските температури в ПК на котела по време на пусковите операции. С намаляването на количеството въздух към горелката с 15% ($\alpha=1,2$) се постига стабилно горене на газовите горелки, без зони с разкъсване на факела. Също така се повишават температурите в печна камера, което благоприятства нормално преминаването към основно гориво – въглища.

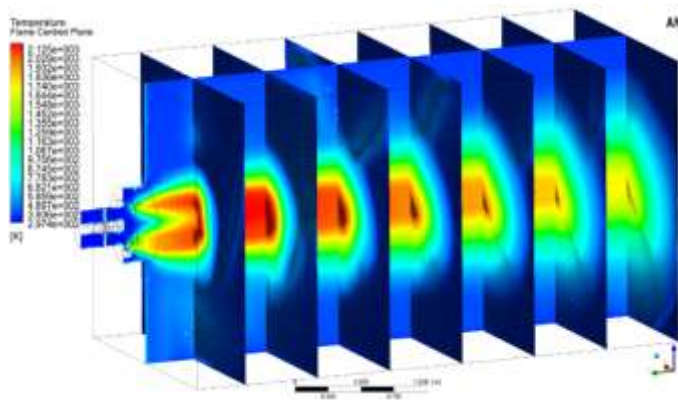
5.3. Моделно изследване на горивния процес след газовата горелка, инсталирана на котли ПК-38-4

Като продължение на обследването на разпределението на въздуха през въздушната кутия на горелката е разгледано смесването на въздуха за горене и природния газ на изхода от газовата горелка и осъществен горивен процес. Този вид горене, с разделно подаване на горимия газ и въздуха за горене е съпроводено с интензивен масообмен. По начина на подаване на двата флуида и тяхното смесване е видимо, че тук се осъществява турбулентно дифузно горене. Направени са два модела на горивния процес на газовата горелка, първия е с коефициент на излишък на въздуха $\alpha = 1,2$ (21 600 Nm³/h), а втория с $\alpha = 1,4$ (25 300 Nm³/h). В следващата Табл.5.4. е показан материалния баланс на двете симулации.

Таблица 5.4.

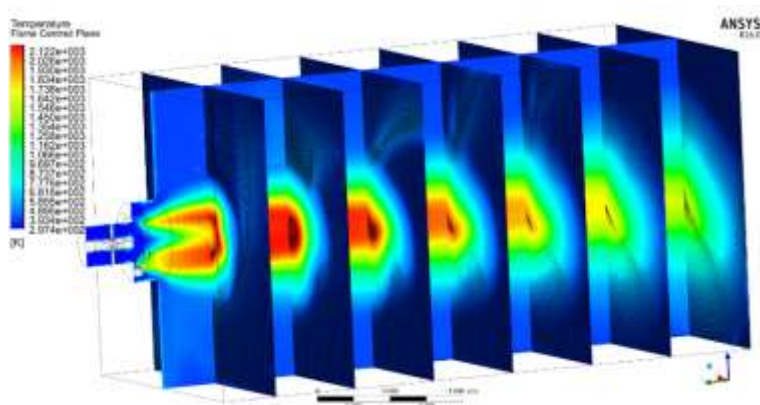
Коефициент на излишък на въздуха	Входове потоци, kg/s	Изходящи потоци, kg/s	(In-Out)/in x100, %
$\alpha = 1,2$	23,637	-23,63	0,03%
$\alpha = 1,4$	29,817	-29,82	-0,01%

Както се вижда от данните в таблицата, стойностите на материалния баланс на входа на



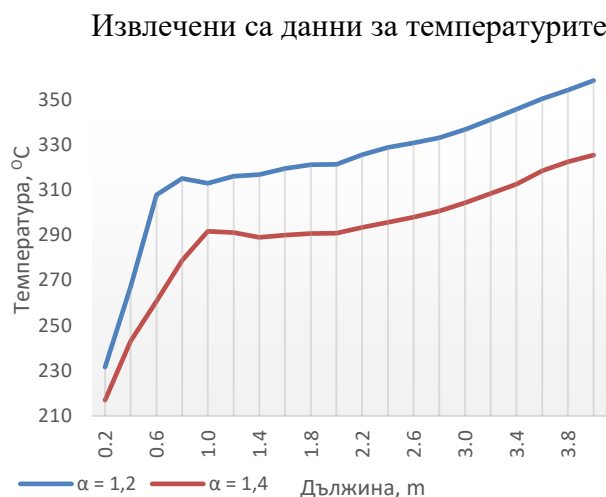
модела и на изхода са равни, следователно моделите отговарят на критериите за сходимост. На Фиг.5.4. е показано температурното поле на горивния процес от извършената симулация на газовата горелка. Максималните температури на факела са над 1900 °C в самото му ядро на около 0,8 m от амбразурата на горелката, а в най-отдалечения край на разглеждания обем (4 m от горелката) - около 1430 °C.

Фигура 5.4. Температурно поле на факела на ГТ при $\alpha = 1,2$



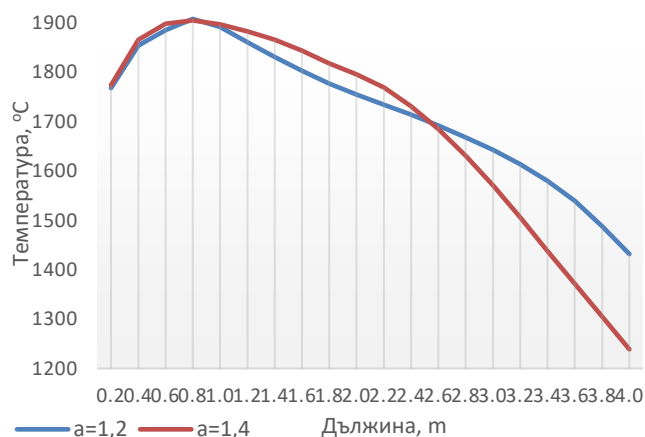
Фигура 5.5. Температурно поле на факела на ГГ при $\alpha = 1,4$

Аналогично на по-горе представения случай е симулирана работата на горелката с по-голямото количество въздух (при $\alpha = 1,4$). Максималните температури на факела са над 1900 °C в самото му ядро на около 1 m от амбразура на горелката, а в най-отдалечения край на разглеждания обем - около 1240 °C (Фиг.5.5.)



Фигура 5.6. Графика на средната температура на полето по дължина на факела

пълното изгаряне на горивото в неговия край и освобождаване на максималното количество топлина. От друга страна вторичния въздух, не участвал в горенето поглъща част от освободената



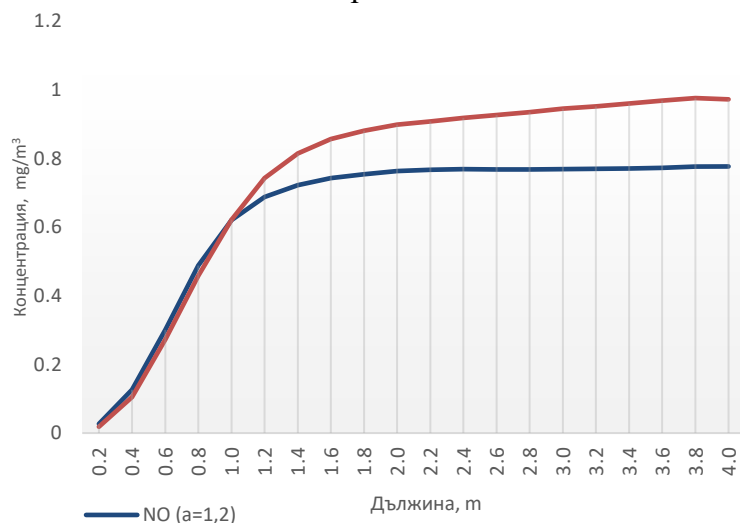
Фигура 5.7. Графика на максималната температура на полето по дължина на факела

топлина и заедно със загубите от топлообмена в пещна камера сформират по-ниските максимални стойности в последните полета.

Това е показано на Фиг.5.7., където са изведени максималните стойности на температурата за всяко поле. Максималните температури в близост до горелката започват от приблизително еднакви температури около 1770 °C и нарастват, като на разстояние около 0,8 m и 1 m от горелката се постигат най-високите температури от 1908 °C и 1904 °C, съответно при $\alpha = 1,2$ и $\alpha = 1,4$.

В случая с по-малко въздух се постигат по-високи максимални температури на по-близко разстояние от горелката и последващо по-бързо намаляване до средата на факела, а при постъпване на повече въздух към горелката, максималните температури се понижават по-бавно до средата на факела. След 2,5 m от амбразура на горелката, двете линии се пресичат и си разменят местата – случая с повече въздух поддържа по-ниски максимални температури до края на факела. В последното поле имаме максимални температури от 1432 °C и 1238 °C, съответно при $\alpha = 1,2$ и $\alpha = 1,4$. Изведени са данните за средната концентрацията на NO за всяко напречно

поле и е изградена графика, показана на Фиг.5.8. Тези стойности на NO са осреднени за цялата площ на всяко напречно поле на факела, включително и зоната извън факела в близост до стените на печната камера. Концентрацията на NO е най-голяма при най-високите температури на факела и се запазват високи до края на изследвания обем от печна камера. Първоначално образуването



Фигура 5.8. Масова концентрация на NO по дължина на факела

на азотни оксиди е по-бързо при модела с по-малко въздух. При $\alpha=1,2$ се наблюдава леко понижаване и запазване на стойностите, докато при $\alpha=1,4$ нарастват до края на изследваната част от факела.

Другото, което прави впечатление е голямата разлика в количеството на азотните емисии - над 16% повече NO емисии при работа на ГГ с коефициент на излишък на въздуха $\alpha=1,4$.

5.4. Аеродинамично изследване на скоростта и разпределението на димните газове в ИВП като част от проблемите с нискотемпературни отложения на пепел и нискосерниста корозия на котли ПК-38-4 в ТЕЦ „Марица Изток 2“ ЕАД

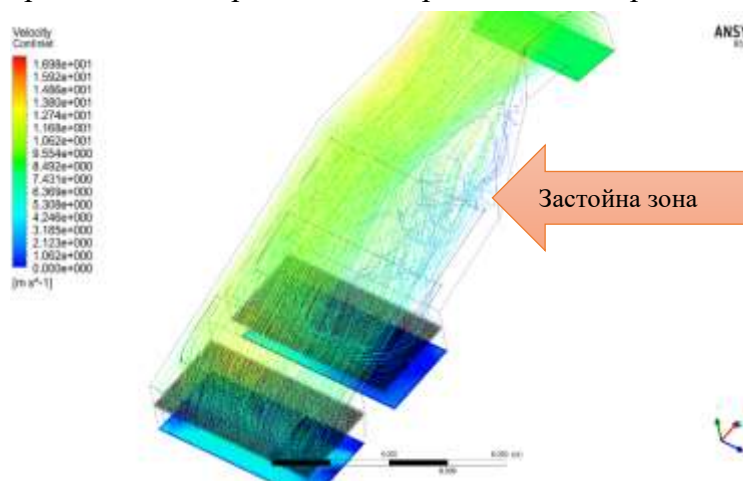
Промяната в режима на работа на котлите и в частност някои от съоръженията, довеждат и до проблеми със сигурната и ефективна работа на ИВП, свързани с нискотемпературни отложения на пепел и прах, както и нискотемпературната корозия. Температурата на стената, на последните по хода на димните газове участъци, не трябва да се понижава под киселинната точка на росата на H_2SO_4 , която е от порядъка на 142-145 °C. Освен това, като причина за отлагането на пепел и прах в ИВП е разгледана вероятността за наличие на ниски скорости на газовете и невъзможността от самоочистване на нагревните повърхности. При проектиране на такъв тип тръбни въздухоподгреватели, оптималната средна скорост на димните газове при уравновесена тяга е $9 \div 11$ m/s. Тук се взема под внимание и самоочистването на тръбите от пепелта носена от димните газове. Минималната скорост на газовете, при която се избягва отлагането на пепел по тръбите е 8 m/s, поради което, за да се осигури самоочистване, се препоръчва да се приложат по-горните граници на скоростите на димните газове и въздуха. От друга страна, реконструкцията на котлите към нискоазотното горене води до допълнително намаляване на скоростите в ИВП. Установено е, че намалението на въздуха за горене по режимни карти е със средно 16%, като максималните стойности са около 25%. Това намаление на въздуха би се отразило само на ниските товари на котела, когато общото количество газове е много ниско и при което количество скоростите са около минималните за не допускане натрупване на пепел и прах по нагревните повърхности. Определянето на скоростите и разпределението на димните газове в ИВП е невъзможно да се осъществи чрез измервания, поради конструктивните особености на съоръжението и липса на подходящи участъци с необходимите размери и условности. Затова е изграден цифров CFD модел на ИВП-ляво на котел №5 (ПК-38-4).

Резултати от изчисленията

Поради огромните си размери, изградения модел на ИВП-ляво е оптимизиран за по-бързо и по-лесно пресмятане в областта на вертикалните кубове. За входни данни (Табл.5.5.), от топлинния разчет на котела са взети температурата и количеството на димни газове на входа на ИВП при номинален паров товар 260 t/h и калоричност на въглицата 6904 kJ/kg: Таблица.5.5

На следващите фигури са показани резултатите от направения модел. Обърнато е внимание на скоростите на потоците в ИВП-ляво, както и разпределението на токовете линии на потока при неговото преминаване през газоходите и тръбите на нагревните повърхности на вертикалните кубове (втора степен) на ИВП. При

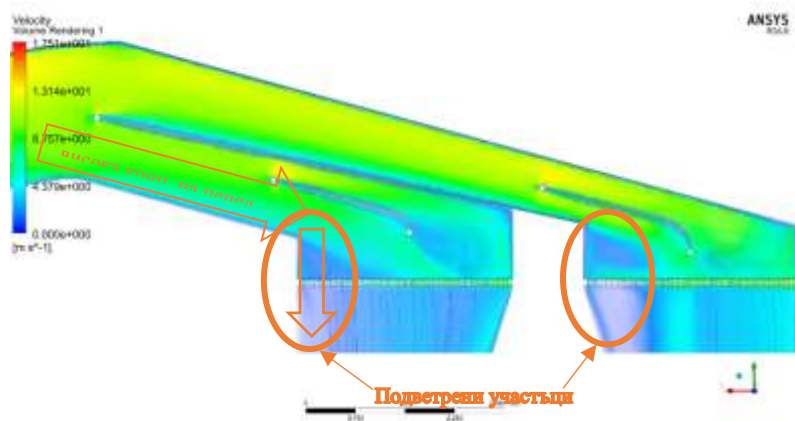
Входни данни		
$F_{\text{дг}}, \text{kg/s}$	$t_{\text{дг}}, ^\circ\text{C}$	Площ, m^2
94	290	9,884



разглеждане на модела на Фиг.5.9. се наблюдава участък след разширението на газохода и преди да достигнат нагревните повърхности, където скоростта е много ниска и се образуват застойни зони, в които е възможно отлагането на пепел. Именно там след всяко спиране на котлите и извършен оглед се наблюдава натрупване на пепел. Това състояние се пренася и по-напред, над самите вертикални кубове – в най-лявата част скоростите са

Фигура 5.9. Скоростни линии на ИВП-ляво от моделното изследване

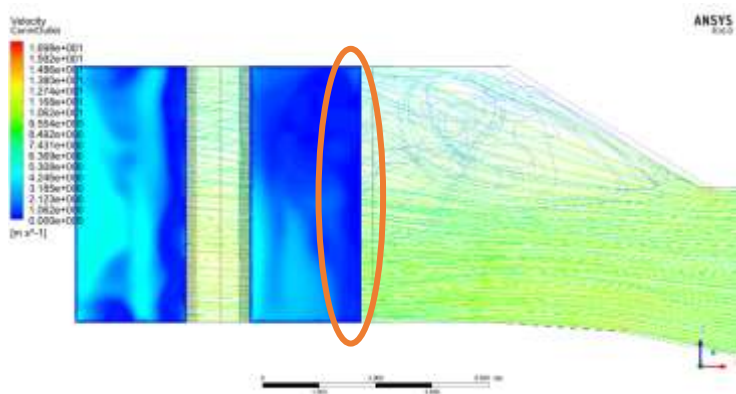
много ниски и има предпоставки за натрупване на пепел, защото от там не преминават достатъчно газове (или преминават с много ниска скорост), които да я отнесат надолу по тракта.



Също така, непосредствено след двата перпендикулярни участъка над тръбите на подгревателя по посока на газовете, отбелязани на Фиг.5.10., се получава подветрен участък и там постъпват минимални количества газове с много ниски скорости.

Фигура 5.10. Скоростни линии на ИВП-ляво, изглед от дясно

От друга страна, пепелта е тежка и по-големите количества от нея се движат в ниските слоеве на потока и има по-голяма концентрация точно в тези участъци, близко до дъното на газохода. Това води до затруднено почистване и натрупване на пепел върху нагревните повърхности в подветрените участъци на вертикалните и хоризонталните кубове.



На Фиг.5.11. е показано скоростно поле на изхода от разглеждания модел, който се явява и вход към следващите по хода на димните газове нагревни повърхности – хоризонталните кубове на първа степен на ИВП. Наблюдават се много ниски скорости и изключително не равномерно разпределение на потоците, като в близост до стената на ИВП, оградено на Фиг.5.11., скоростите са под 1 m/s и близки до нула.

Фигура 5.11. Скоростно поле на изхода на ИВП-ляво

Максималната скорост на входа е 8,76 m/s, средната е 7,3 m/s. На изхода е 5,2 m/s при средна скорост за цялото разглеждано поле от 3,26 m/s. Тези ниски скорости на изхода се дължат главно на промяната на площта на газохода. На лице са много ниски скорости и неравномерно разпределение на димните газове, което води до невъзможност от самоочистване на нагревните повърхности от пепел.

Таблица 5.6.

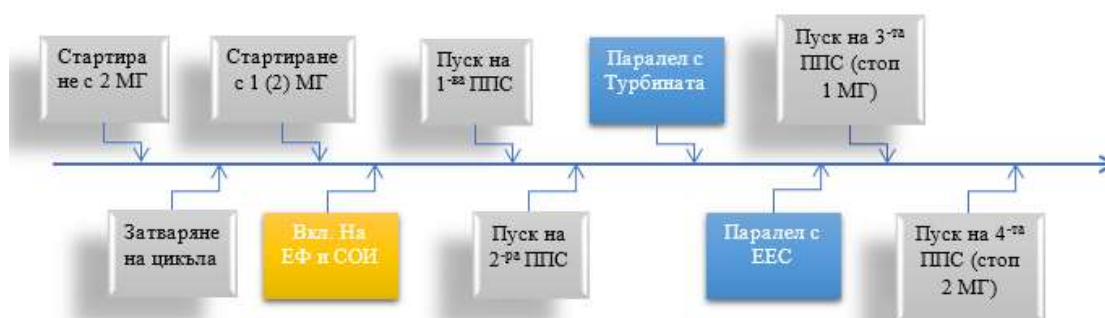
	Площ, m ²	Средна скорост, m/s	Минимална скорост, m/s	Макс. скорост, m/s	Поток димни газове F _{дг} , kg/s
Вход	9.884	8.035	7.335	8.766	94
Изход	39.76	3.263	0.02621	5.213	-94.01
Тръби	11.77	9.182	0.008491	15.39	-

Текущата конструкция на ИВП не осигурява правилно разпределяне и достатъчно високи скорости на изтичане на димните газове, като в същото време не разполага с механизъм за промяна на разпределението им.

5.5. Необходимост от промяна пусковия алгоритъм на котли ПК-38-4 в “ТЕЦ Марица изток 2” ЕАД и създаване на нов при използване на разпалващо гориво природен газ

Необходимостта от промяната на алгоритъма за пуск на котлите се дължи на замяната на разпалващо гориво мазут с природен газ. Продуктите на горенето в следствие на неговото изгаряне са CO₂ и водни пари. Това позволява включването на ЕФ и СОИ непосредствено преди пуска на въглищните горелки, за да се уловят емисиите от SO₂ и прах. Задължително условие е температурата на ДГ в ПК да бъде над 450 °C за да се включи прахова горелка.

Поради липса на мазни сажди в димните газове от мазута, при този режим, е възможно включването на ЕФ и СОИ непосредствено преди пуска на въглищните горелки, за да се уловят емисиите от SO₂ и прах.

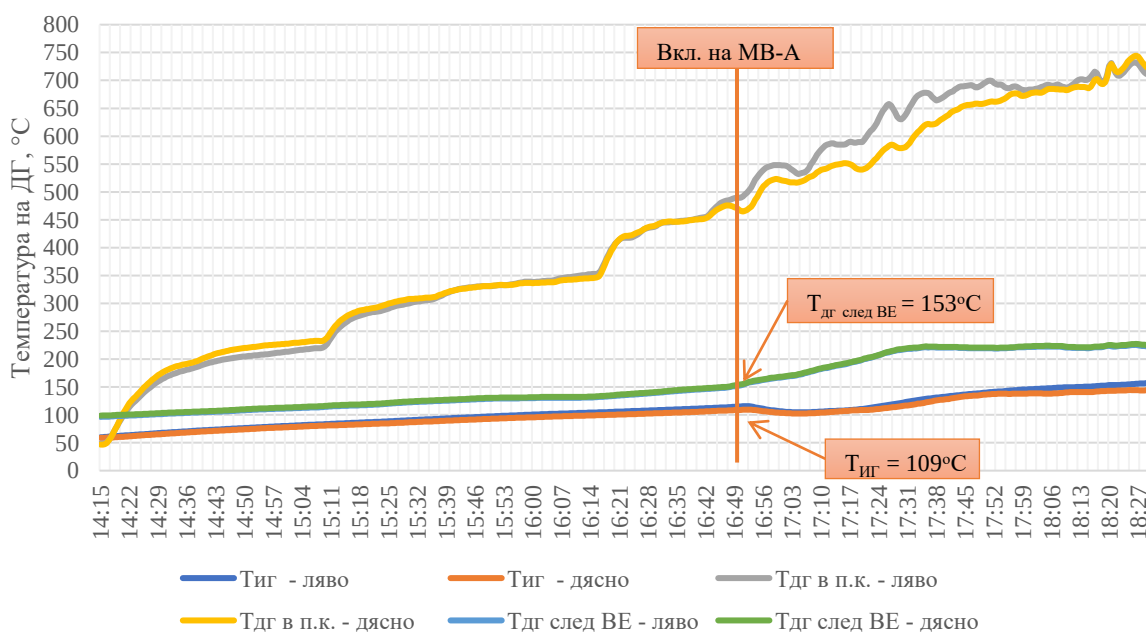


Фигура 5.12. Алгоритъм за пуск от студено състояние на ПК-38-4 при разпалване на природен газ

Схематичното представяне на новия алгоритъм е показано на Фиг.5.12. Същественото при тази промяна е, че се променя момента на включване на ЕФ и СОИ. Видимо от графиката, включването е при по-ниски температури на ДГ в ПК, а от тук следва и по-ниски температури пред ИВП и пред ЕФ.

С влизането в сила на новия алгоритъм за пуск на котлите се наблюдава промяна в работата на ЕФ. В периода на включване на прахова горелка, филтърът трябва да работи, но при включване на неговите агрегати, те правят късо съединение. При ИВП се наблюдава тенденция към замърсяване на между-тръбното пространство с пепел и прах, както и корозия по тръбите. Тези неизправности са свързани с изгарянето на газ в пусковите периоди на котлите. Преминаването на влажните ДГ през нагревните повърхности води до тяхното охлаждане, което намалява способността им да задържат влагата в себе си. По време на пусковите операции въздухът за горене байпасира ИВП с цел да се избегне прекомерно охлаждане на ДГ и кондензиране на влагата в газовете. Недостатък се явява не пълното уплътняване на байпасните клапи и малки количества въздух преминават през ИВП. Създава се предпоставка за по бавно повишаване на температурите на ДГ на изхода от съоръжението. Подобна е ситуацията показана на Фиг.5.13., където по време на включване на МВ температурата на ДГ пред ИВП е 153°C, а след него е 109°C – твърде ниска температура. Възможно е да се премести включването на МВ след повишаване на Т_{ДГ} пред ИВП над 200 °C, при което Т_{ИГ} да е над 150 °C.

Свалени са експлоатационните данни на няколко пускови операции на котли ПК-38-4, построени са диаграми и са направени анализи. На Фиг.5.13. са показани температурите на ДГ в ПК, на изхода от конвективна шахта (КШ) – преди да постъпят в ИВП, и температурата пред ЕФ – изходящите газове от ИВП за котел с номер №5.



Фигура 5.13. Действителен пуск от студено състояние на ПК-38-4 при разпалване на природен газ (КА-5)

Температурите на изходящите газове са високи, но не достатъчно. Налице са температури, при които в ИВП кондензира част от влагата в ДГ и се образуват отлагания (налепи) от пепел и прах по нагревните повърхности, в следствие на което протича нискосерниста корозия. При тези условия, водните пари в димните газове постъпващи в ЕФ кондензират и е невъзможно

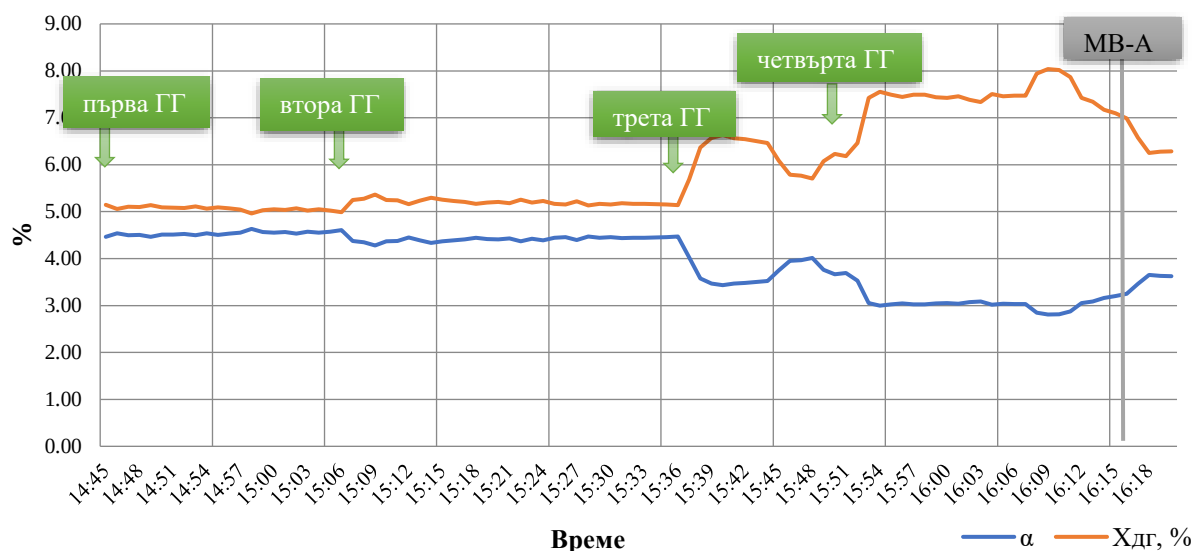
включването на неговите агрегати. При този пуск в момента на включване почти всички агрегати окъсяват. Опитно е установено, че след повишаване на температурите над 120-130 °C този проблем намалява и изчезва. В случая отново може да се промени пусковия алгоритъм и да се премести пуска на ЕФ след повишаване на температурите. Това би означавало изхвърлянето на вредните емисии отново в атмосферата без никакво пречистване и би обезсмислило донякъде преминаването на разпалващо гориво природен газ. Друго решение би било пуска на въглищна горелка да се извърши след като се повишат температурите на ДГ на изхода от ИВП над 150 °C, т.е. да се пуснат в работа още газови горелки, които да обезпечат с топлина котела. Същевременно се работи в насока да бъдат ремонтирани клапите за въздух за горене към ИВП, които в началото на пуска са затворени. Дори малките количества студен въздух през тях биха повлияли за ниските температури на ДГ на изхода от ИВП и преди ЕФ.

Най-засегнати са последните по ход на ДГ нагревни повърхности в ИВП, а именно хоризонталните кубове. На изхода им, температурите на ДГ са най-ниски. Както бе споменато по-горе, заслуга за тези ниски температури имат и запорните клапи на въздуха. Този въздух трябва да байпасира ИВП, но малка част преминава през него и го охлажда. Най-съществената причина за ниските температури на изхода от КШ е голямото количество въздух за горене, подавано в ПК. По проект, за нормална работа на ГГ, статичното налягане на въздуха за горене към тях трябва да бъде над 4mbar. При тази стойност количеството на въздуха е няколко пъти над необходимото. Главната причина за това е техническата (конструктивна) невъзможност на клапите за въздух за горене пред праховите горелките да спрат на 100% преминаващия въздух. Този въздух не участва в горенето, но влошава топлообмена.

5.6. Проведени експериментални пускове с новия алгоритъм за пуск при използване на разпалващо гориво природен газ

Чрез използване на методиката за пресмятане на влагосъдържанието в димните газове при пусковите операции на котлите в ГЛАВА ТРЕТА (точка 3.4) и след заместване в пусковите диаграми от действителен пуск от студено състояние на ПК-38-4 при разпалване на природен газ (Фиг.5.13.) е изградена нова диаграма, на която е показано изменението на коефициента на излишък на въздух (α) и влагосъдържанието в ДГ ($X_{дг}$). На Фиг.5.14. е показана графика с $X_{дг}$ и α за пуск от студено състояние на КА-5.

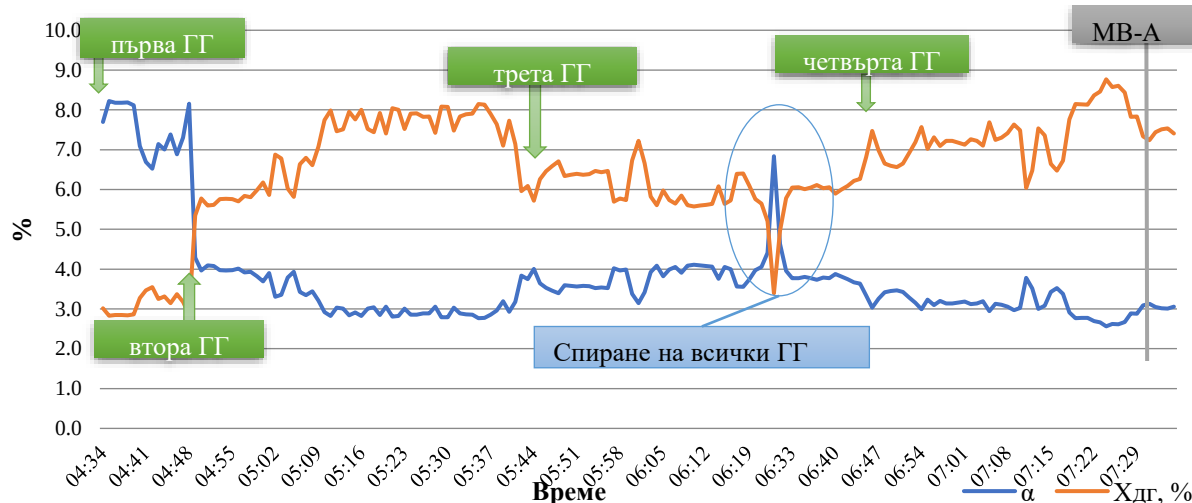
Очевидна е връзката между коефициента на излишък на въздух и влагосъдържанието в ДГ. С увеличение на α , влагата в ДГ намалява и обратно. Наблюдава се много висока стойност на коефициента α , която трябва да бъде намалена. След всеки пуск на ГГ, коеф. α намалява. Това се дължи на защитните стойности за разхода на въздух за горене, под които газовата инсталация спира. Затова въздухът се държи малко над тази стойност по време на пускане още на първата ГГ и така до пускане на прахова горелка.



Фигура 5.14. Действителен пуск от студено състояние на ПК-38-4 при разпалване на природен газ (КА-5)

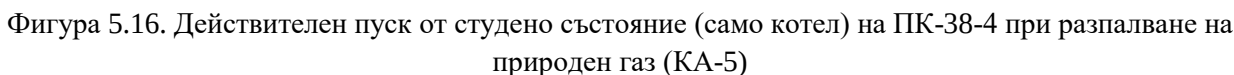
Направена е промяната на алгоритъма на пуск, свързана с намаляване на общото количество въздух за горене към горелките и байпасиране на ИВП до достигане на достатъчно високи температури на ДГ след него за да се избегне кондензация на водните пари в тях. Проведен е експериментален пуск на КА-5 с новия алгоритъм, намалено е количеството на въздуха за горене с 25%. Това е малко под защитните стойности (поради което защитите бяха изведени), при които ГГ имат устойчив факел.

Свалени са данните на основните експлоатационни параметри, необходими за анализа. На следващата Фиг.5.15. са показани коефициента на излишък на въздух и влагосъдържанието в ДГ.



Фигура 5.15. Действителен пуск от студено състояние (само котел) при разпалване на природен газ (КА-5)

При сравнение на данните от Фиг.5.15. с данните от Фиг.5.14. се вижда трайно по-ниски стойности на α , което се дължи на по-малкото въздух за горене към ПК на котела. Нормално, влагата в димните газове нараства. Поради технически проблеми с регулатора на налягане на природния газ на диаграмата е отбелязан и момента на изгасване на всички ГГ и последващото им запалване. След промяна на алгоритъма за пуск на котела, запалването на първата прахова горелка е изместено в период с по-благоприятни температури. На следващата Фиг.5.16. е показана графиката с тези параметри при пуск на КА-5 от студено състояние, но при работеща турбина с друг котел.



Анализирано е влиянието на броя работещи газови горелки и коефициента на излишък на въздух α върху температурата ($t_{\text{дг}}$) и влагосъдържанието ($X_{\text{дг}}$) на димните газове, а от там и върху работата на ИВП и ЕФ. Описан е нов алгоритъм за пуск на котлите, като са установени основните репери за включване на праховите горелки, ИВП, ЕФ и СОИ, при които те да работят надеждно.

- Технологично е невъзможно да се ограничи излишния въздух за горене към ПК, поради неплътности в клапата за горещ въздух към праховите горелки.
- Заложени са по-високи защитни стойности на въздуха за горене на газовата инсталация
- Включването на праховите горелки се съобразява само с температурата на ДГ в ПК, която трябва да бъде по-висока от 450 °С.

Страница 31 от 33

на влагата в ДГ и последващо замърсяване на нагревните повърхности и нискотемпературна корозия.

Изведени са две основни условия за включването на ИВП, ЕФ и прахова горелка, които се от съществено значение и трябва да се следят:

- температурата на димните газове в горивната камера трябва да бъде над 500-550 °C
- температурата на димните газове след ИВП трябва да бъде над 157°C за да се избегне кондензацията на влагата в ДГ и последващо замърсяване на нагревните повърхности и нискотемпературна корозия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Като резултат от представеното изследване могат да бъдат направени определени обобщения, посочвайки значението му за експлоатацията на въздухоподгревателите на енергийните котли, изгарящи нискокачествени лигнитни въглища. Тази обобщена оценка дава основание да се твърди, че тя съответства на формулираната ЦЕЛ на настоящия дисертационен труд (формулиран в Глава Първа), както и че има претенции за известни приноси, които биха могли да бъдат отнесени към категориите:

- Научно-приложни приноси;
- Инженерно-приложни приноси.

Научно-приложни приноси

1. Създаден е цифров симулационен модел на работа на разпалващата газова горелка монтирана на мощен правотоков енергиен котел. С негова помощ е изследвано и оптимизирано смесването на гориво-въздушната смес, както и самия горивен процес;
2. Аналитично е определена точката на оросяване на димните газове при изгаряне на течен котелно гориво, природен газ, както и при едновременно изгаряне на природен газ и лигнитни въглища (в различно съотношение);
3. Въведен е критерий за безопасна работа на въздухоподгревателя, а именно: минимална температура на въздуха на входа му, при изгаряне на различни горива (течно котелно гориво, природен газ, едновременно изгаряне на природен газ и лигнитни въглища в различни съотношения);
4. Създаден е цифров симулационен модел на работата на повърхностен въздухоподгревател на мощен правотоков енергиен котел. С получените резултати са локализираны най-заstraшените повърхности за възникване на нискотемпературна сярна корозия. Резултатите от модела са валидирани с натурни изпитания.

Инженерно-приложни приноси

1. Анализирани са броят на пусковите операции на годишна база на мощен правотоков енергиен котел, експлоатиран в „ТЕЦ Марица Изток 2“ ЕАД, за достатъчно дълъг период от време, при което е дефинирано: разходът на течен котелно гориво за пуск от горещо, неизстинало и студено състояние на котлите; коригирани са пускови диаграми за различните типове пускове (горещо, неизстинало и студено състояние);

2. Определени са емисиите от прах, серен диоксид SO_2 и въглероден диоксид CO_2 които се генерират от мощен правотоков енергиен котел при различните типове пускови операции, които се емитират в околната среда;
3. Определен е разходът на природен газ необходим за пускане на мощен правотоков енергиен котел за различните типове пускове (горещо, неизстинало и студено състояние), при което са изготвени нови алгоритми и пускови диаграми, като е анализирано количеството на спестените емисии от въглероден диоксид CO_2 при разпалване на котлите с природен газ, както и спестените емисии от прах и серен диоксид SO_2 , от по-ранното въвеждане в работа на електрофилтъра и сяроочистващата инсталация;
4. Създаден е изцяло нов алгоритъм за въвеждане в експлоатация на мощен правотоков енергиен котел при използването на природен газ, като разпалващо гориво, при който се намалява до минимум вероятността от нискотемпературна сярна корозия, при който се следи с каква температура се подава въздуха за подгръване в изнесения повърхностен въздухоподгревател в зависимост от изгаряното гориво.

Части от настоящия труд са станали достояние на научната и професионална общественост, чрез научни публикации (10 броя), представени на научни форуми.

Summary

Analysis of the start-up modes of boilers burning lignite coals with the aim to increasing their operational and environmental security

Author: Eng. Nikola Baykalov

Commissioning of an energy steam generator is one of the most responsible and complex non-stationary modes of operation. The analysis of the start-up modes, with the aim of their optimization, generally contributes to the improvement (efficiency, environmental, reliability and others) of the operation of the boilers. The object of research are the boilers at the TPP "Maritsa-Iztok 2" EAD. In the presented PhD thesis, similar analyzes were made related to the start-up operations of the steam generators and their transition from fuel oil to natural gas as a start-up fuel. Particular attention is paid to the boiler type PK-38-4 and the problems with the air heaters that arose as a result of this replacement.

The PhD thesis presents analytical, field and model studies of the object, as well as some basic connections between them - conducting full-scale tests, measurements and mathematical modeling by applying computational fluid mechanics.

The purpose of this thesis is, research, analysis and implementation of technological solutions for safe and reliable operation of boilers and their equipment during start-up periods and stationary regimes thereafter. A completely new algorithm and start-up diagrams have been created for putting the PK 38-4 boiler into operation using natural gas as a start-up fuel, which minimizes the probability of low-temperature sulfur corrosion of the last gas preheaters.